

# **A Pásztázó Elektronmikroszkóp képének feldolgozása LabVIEW segítségével**

## **Témalaboratórium**

**Tóth Ádám Raymond**

**Mikroelektronikai tervezés specializáció**

**Konzulens: Dr. Neumann Péter Lajos, adjunktus**

Budapest

2018

# Tartalomjegyzék

|   |    |
|---|----|
| Abstract .....  | 3  |
| Összefoglalás .....   | 3  |
| Bevezetés.....  | 4  |
| I. Felépítés .....  | 5  |
| 1. Vákuumrendszer .....                                     | 5  |
| 2. Elektronágyú.....  | 6  |
| 3. Mágneses lencsék.....                                    | 6  |
| 4. Páztázó tekercsek .....                                  | 6  |
| 5. Detektor.....  | 6  |
| II. Gerjesztett jelek .....                                 | 9  |
| 1. Szekunder elektronok.....                                | 9  |
| 2. Visszaszórt elektronok.....                              | 9  |
| 3. Abszorbeált elektronok .....                             | 10 |
| 4. Röntgensugárzás .....                                    | 10 |
| 5. Fényemisszió .....                                       | 10 |
| 6. Elektronsugárindukálta áram .....                        | 10 |
| 7. Auger-elektronok.....                                    | 10 |
| III. Analóg jelfeldolgozás és digitális képmegmunkálás..... | 11 |
| 1. Alapfogalmak.....  | 11 |
| a. Képpont .....  | 11 |
| b. Mélységélesség.....                                      | 11 |
| c. Kontraszt.....   | 12 |
| d. Jel-zaj viszony .....                                    | 12 |
| e. Felbontóképesség.....                                    | 12 |
| 2. Jelfeldolgozás .....                                     | 12 |
| a. Differenciális erősítés.....                             | 12 |
| b. Gammaszabályozás .....                                   | 12 |
| c. Jeldifferenciálás.....                                   | 13 |
| d. Y-moduláció.....   | 13 |
| 3. Képmegmunkálás .....                                     | 13 |
| IV. LabVIEW .....   | 17 |
| 1. Front panel .....  | 17 |
| 2. Blokk diagramm.....                                      | 18 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| Irodalomjegyzék ..... | 19 |
|-----------------------|----|

# Abstract

During training project laboratory, I worked on using scanning electron microscope with LabVIEW. The goal was a LabVIEW programme, which connected to output signals of the SEM, it can map the sample. The software also can make simple digital image processing to help the user.

# Összefoglalás

A témalaboratórium keretei között a pásztázó elektronmikroszkóppal és a LabVIEW környezettel foglalkoztam. Egy olyan LabVIEW program volt a cél, ami a mikroszkóp kimeneti jeleire kötve meg tudja jeleníteni a minta leképezését, illetve digitális képfeldolgozást is tud rajta végezni, ezzel segítve a felhasználót, hogy több hasznos információt nyerhessen a mintáról.

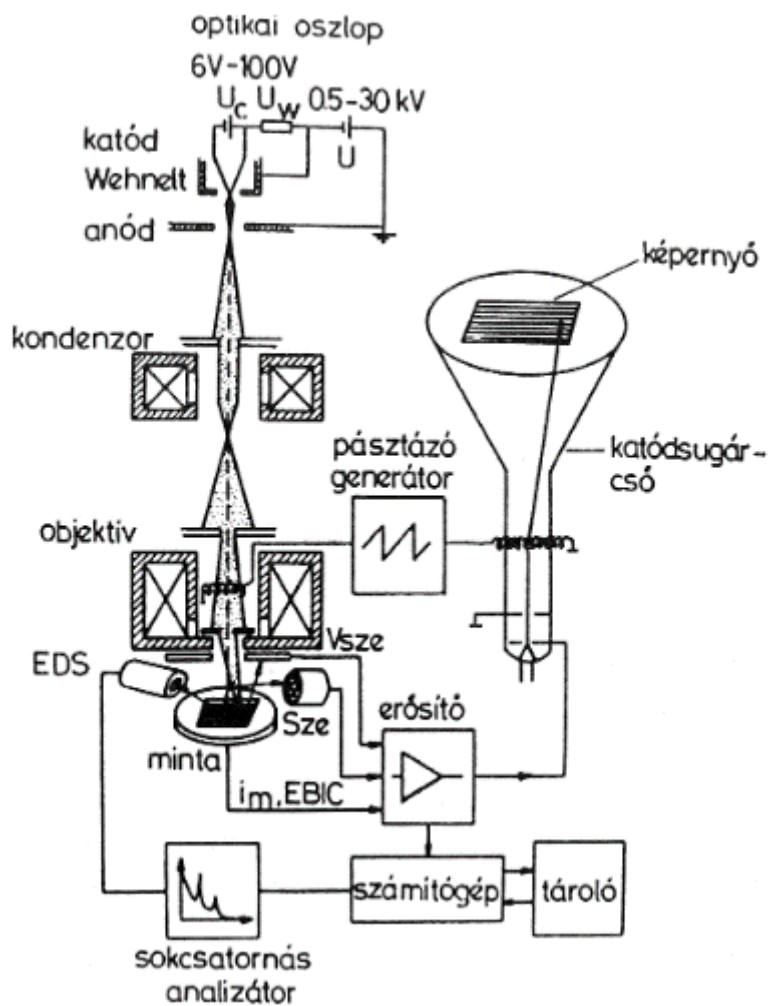
# Bevezetés

A pásztázó elektronmikroszkóp, az angol szakirodalomban scanning electron microscope (továbbiakban csak SEM), egy olyan eszköz, ami leképezi a minta felszínét. Ezt olyan módon teszi meg, hogy egy fókuszált elektronnyalábbal végig pásztázza a minta felületét, amiből ennek hatására elektronok lépnek ki és ezeket észleli. A leképezés a képcsöves televíziók pásztázásához hasonlít. A mikroszkóp jeleit egy LabVIEW-val (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) programozható eszköz fogadja, dolgozza fel és jeleníti meg.

A fénymikroszkópokhoz képest a SEM sokkal jobb felbontóképességgel rendelkezik, míg az első a fény hullámhossza miatt kb. 500 nm-ig képes lemenni, addig egy átlagosnak mondható elektronmikroszkóp 5 nm-es felbontásra képes (speciális téremissziós katóddal 1 nm). Mélységélességet tekintve a pásztázó elektronmikroszkóp 3-4 mm-ével szemben a fénymikroszkóp 1-10  $\mu\text{m}$  ér el.

Az első pásztázó elektronmikroszkóp 1942-ben építette Vladimir Kosmich Zworykin. Kereskedelmi forgalomba 1965-ben került.

# I. Felépítés



## 1. Vákuumrendszer

A pásztázó elektronmikroszkóp működésének egyik feltétele, hogy az elektronágyú nagyvákuumban van, ez azért szükséges, hogy a környezetében ne keletkezzenek pozitív ionok, amik az ellenkező töltések vonzása miatt megromcsolnák a katódot. Másik célja az, hogy megakadályozza a krakkolást, ami annyit jelent, hogy az elektronnyaláb lebontja a levegőben lévő szénhidrogéneket és egy szénréteget hoz létre a minta felületén. Elővákuumot létrehozhatunk egy rotációs szivattyúval, majd ezt tovább javíthatjuk diffúziós vagy turbó molekuláris szivattyúval (ez kiegészülhet ion szivattyúval is).

## **2. Elektronágyú**

Az elektronágyú hozza létre az elektronnyalábot, aminek nyalábátmérője fordítottan arányos a felbontóképességgel. Az átmérő csökkentésével csökken a nyaláb árama is, ami zajos képhez vezethet, ezért nagy forrásfényességre van szükségünk. A fényességet az egységnyi térszögre vonatkoztatott áramsűrűséggel mérjük. A legelterjedtebb katódok a termikus volfrám-, lantán-hexaborid-, cérium-hexaborid- és a termikus katód.

## **3. Mágneses lencsék**

Az elektronnyaláb fókuszálására használnak mind mágneses mind elektromos lencsét, de a SEM esetében a mágneses elterjedtebb, mivel könnyebben kezelhetők és kisebbek a lencsehibák. Feladata a minimális nyalábátmérőt lekicsinyítse a minta felületére, ezt a Lorentz erő segítségével éri el.

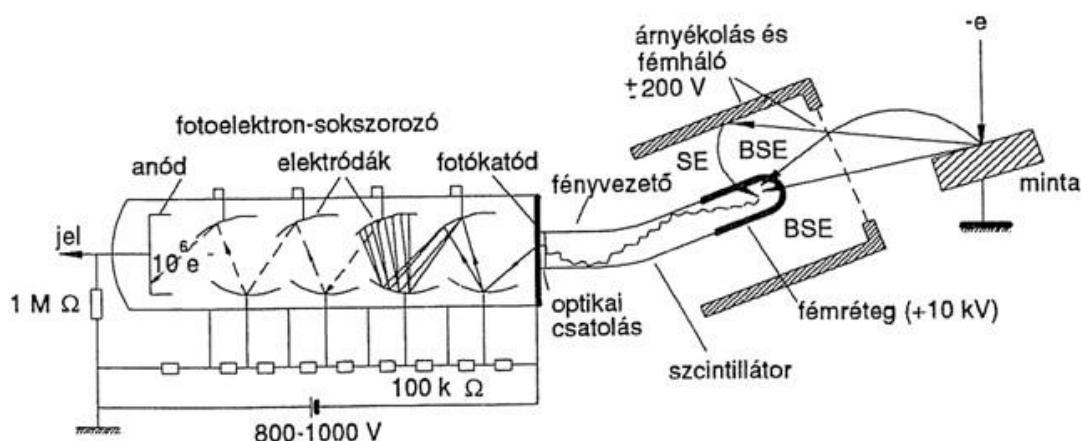
## **4. Pásztázó tekercsek**

A pásztázást két tekercspár segítségével valósítják meg. A vízszintes és a függőleges eltérítést is fűrészfogas jelekkel irányítják. Lassú pásztázással javítható a jel-zaj viszony. Analóg esetben a nyaláb folyamatosan mozog, míg digitális pásztázáskor a nyalábot diszkrét értékek vezérlik. Ez utóbbinak az az előnye, hogy elterjedtebb a számítógépes vezérlés, képfeldolgozás és automatizálás területén

## **5. Detektor**

A szekunder és visszaszórt elektron-kép előállításában leggyakrabban használt az Everhart-Trornley detektor, amely úgy működik, hogy a mintáról jövő elektronok vékony fémréteggel bevont szcintillátorba csapódnak, és ez által fényfelvillanásokat okoznak. Az így

keletkezett fényjelek fényvezetőn keresztül kerül a fotoelektron-sokszorozóba, amelynek első elektródáján elektronokat váltanak ki. A szcintillátort egy fémréteg borítja, amire +10kV-os feszültséget kapcsolunk, ez elősegíti a szekunder elektronok gyorsítását, amik gyorsítás nélkül nem lennének képesek áthatolni ezen a fémrétegen. A szcintillátor körül egy fém ház is megtalálható, ami árnyékolja a szekunderelektron-detektor hatását az elektronnyalábra. Erre a fémháza kapcsolt potenciállal lehet befolyásolni, hogy milyen jeleket detektálunk, ha csak visszaszórt elektronokat akarunk, akkor ezt a potenciált 50 V-ra állítjuk be (visszaszórt elektron-üzemmód). Ellenkező esetben mind visszaszórt- mind pedig szekunderelektronokat is észlelünk, de geometriai elhelyezkedés miatt szekunder elektronból többet (szekunderelektron-üzemmód).



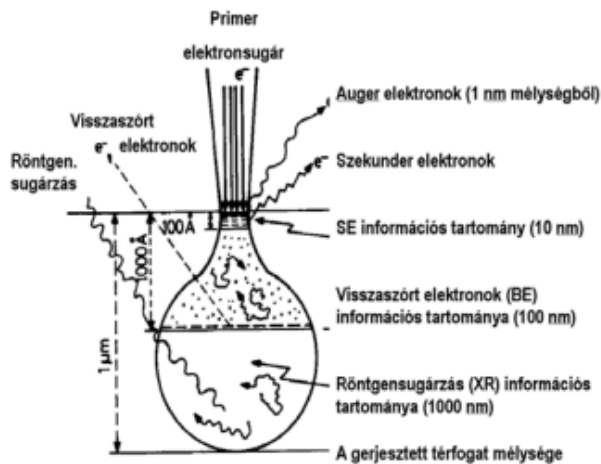
Az előbb ismertetett, módok hatással vannak a kapott kép megvilágítására, és erős összefüggést mutat a fényoptikai megvilágítással. Visszaszórt elektron üzemmódban a fémház előfeszítése miatt nem észlelünk szekunder elektronokat csak visszaszórt elektronokat, ez utóbbit nagy sebessége miatt a minta detektorral ellentétes irányba néző részeiről nem tudunk begyűjteni. Ezért ezek a részek sötétek maradnak a képen, ami olyan hatást kelt, mintha a mintát egyik oldaláról egy pontból világítottuk volna meg. Szekunderelektron üzemmódban való leképezéskor a mintából kilépő szinte összes szekunderelektront (50-100%) detektáljuk, valamint



elnyelő mennyiségű visszaszórt elektront is. Ebben az esetben a megvilágítás annak felel meg, mintha körben minden irányból, a minta minden része egyenletesen lenne megvilágítva

## II. Gerjesztett jelek

Az mikroszkóp által besugárzott elektronok többféleképpen lép kölcsönhatásba a mintával, ami e gerjesztés hatására, egy adott gerjesztési térfogatból különböző jeleket pl.: elektronokat, sugárzást, fényemissziót bocsát ki magából



### 1. Szekunder elektronok

Az 50 eV-nál kisebb elektronokat hívjuk szekunder elektronnak. Ezek úgy keletkeznek, hogy a besugárzó elektronnaláb leszakítja őket a külső elektronhéjról. A szekunder elektronok a minta felületi geometriájáról (topográfiájáról) hordoznak információt, velük készíthető a legjobb felbontású kép, mivel kis energiájuk miatt kisebb mintapontokból származnak a többi jelhez képest

### 2. Visszaszórt elektronok

Az 50 eV-nál nagyobb energiájú elektronokat visszaszórt elektronnak nevezzük. Mind topográfiai mind kompozíciós (kémiai összetétel) információt hordoznak. A rendszámfüggése monoton növekvő, így a minta nagy rendszámú elemekben sűrűbb részei világosabban jelennek meg.

### 3. Abszorbeált elektronok

A besugárzó áramból a mintában abszorbeált elektronok alkotják a mintaáramot, ami kémiai információt tartalmaz. A visszaszórt elektronhoz képest a kapott képnek fordított a kontrasztja.

### 4. Röntgensugárzás

A mintából kétfajta röntgensugárzás lép ki. Az egyik az elektronok rugalmatlan ütközése során energiavesztéséből létrejövő karakterisztikus röntgensugárzás. A másik a lassú elektronok által kisugárzott energiából adódó folytonos röntgensugárzás. Mindkettő kémiai információt hordoz a mintáról.

### 5. Fényemisszió

A fényemissziót vagy más néven katódlumineszcenciát, a mintát érő nagy energiájú elektronok gerjesztik. A kibocsátott fényt vizsgálva a rekombinációs centrumok helyéről kaphatunk információt.

### 6. Elektronsugár-indukálta áram

A besugárzás hatására áram indukálódik a p-n átmenetekenél (vagy Schottky-átmenetekenél), így ezekről a helyekről kaphatunk információt.

### 7. Auger-elektronok

Ha a nyaláb egy belső héjről lök ki elektront, akkor a külső héjről „beugrik” a helyére egy másik, energiafeleslegét vagy kisugározza, vagy kilök egy másik elektront, ami elviszi az energiakülönbséget, ezt nevezzük Auger-elektronnak. Ezek az elektronok nem tartalmaznak számunkra információt.

### III. Analóg jelfeldolgozás és digitális képmegmunkálás

A detektált jelek jel- és képfeldolgozására az emberi tényező miatt van szükség. Ugyanis a leképezett kép lényegében egy fekete-fehér (monokromatikus) intenzitás mátrix, de az emberi szem csak bizonyos intenzitáskülönbségeket tud észrevenni, így a felhasználó egyes részleteket, apró különbségeket nem tud megfigyelni. A legkisebb intenzitásbeli különbség, amit már az emberi szem észlelni tud kb. 5%. A fényérzékelése logaritmikus, azaz kis fényességtartományban jobban meg tud különböztetni, mint nagyban. Ezekből adódóan a szem olyan 15-20 szürkességi fokozat között tudja észrevenni az eltérést. Valamint a szem tulajdonságai miatt meg kell különböztetnünk az élfelbontást és a pontfelbontást.

#### 1. Alapfogalmak

##### a. Képpont

A pásztázó elektronmikroszkópiában fényképezésre használt katódsugárcső által kibocsátott elektronsugarának átmérője kb. 100µm. A kapott képen nem fogunk tudni kisebb részleteket felfedezni, mint amekkora ennek a 100 µm-nek a minta felületén megfelelő része. A minta felületén lévő képpont mérete:  $d = 100 \frac{\mu m}{M}$ , ahol az M a nagyítás.

A képet akkor látjuk élesnek, ha az elektronnyaláb átmérője kisebb, mint a képpont mérete.

##### b. Mélységélesség

Egyenetlen felületű minta esetén a mintának azon része látszik élesnek, amire az elektronnyaláb fókuszált, más részei viszont kevésbé élesek a nyaláb széttartása miatt. A kép ott válik életlenné ahol két vagy

kettőnél több képpont méretűvé szélesedik. A mélységélesség a nyaláb széttartásával és a nagyítással változtatható.

### c. Kontraszt

Két képpont közötti kontrasztot a  $C = \frac{S_2 - S_1}{S_2}$  képlettel definiálunk.

Az  $S_1$ ,  $S_2$  az 1-es és 2-es pontban mért intenzitás.

### d. Jel-zaj viszony

Egyetlen képpont különböző időpontokban detektált jelei átlagértékük körül szórást mutatnak.

### e. Felbontóképesség

Pontfelbontás esetén két pont a Rayleigh-kritérium alapján különíthető el, ami azt mondja ki, hogy két pont különálló, ha az áramsűrűség a két pont felezőjében a pontokban felvett maximális érték 75%-a. Ha egy élre merőlegesen pásztázunk, akkor pontfelbontás esetén a kép nem egy lépcső jelenik meg, hanem az él és az elektronnyaláb konvolúciója.

Definíció szerint az élfelbontás az a távolság, amelynek két végpontját az intenzitáseloszlás 25% és 75% pontja jelöli ki.

## 2. Jelfeldolgozás

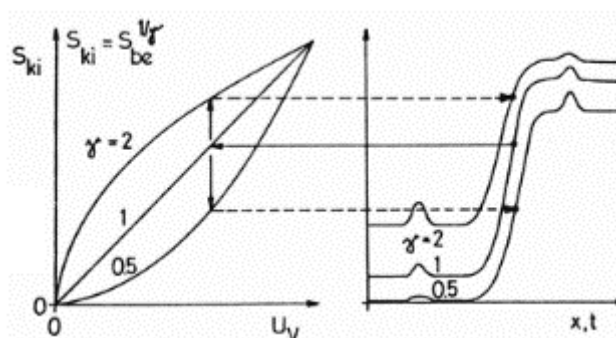
### a. Differenciális erősítés

Differenciális erősítés esetén a jelből kivonják az egyenáramú komponenst, majd lineárisan erősítik. Kép zajossága is megnő mivel az váltóáramú összetevő.

### b. Gammaszabályozás

A gammaszabályozás egy nemlineáris erősítés, ahol a kimenő jel a következőképpen áll elő  $S_{ki} = S_{be}^{1/\gamma}$ . Kis intenzitású tartományban a

gammát 1-nél nagyobbra választva növelhető a kontraszt, míg nagy intenzitású részeknél, 1-nél kisebbre választva a gammát tudjuk javítani a részleteket.



### c. Jeldifferenciálás

A jeldifferenciálás azt jelenti, hogy az  $U = U_0 \times \sin(\omega \times t)$  jelet deriváljuk. Ebből azt az egyenletet kapjuk, hogy  $\omega \times U_0 \times \sin\left(\omega \times t - \frac{\pi}{2}\right)$ , amiből látszik, hogy kaptunk felüláteresztő szűrőt, aminek a határfrekvenciája  $\omega$ -nál van. Ez a  $\omega$  alatti, kis frekvenciájú jeleket elnyomja, a nagy frekvenciájúakat pedig felerősíti. Ez azt segíti elő, hogy a mintán előforduló éles határok, pl.: szemcsehatár, élek, kontúrok felerősödnek, míg a homogén részek eltűnnek. A jeldifferenciálással kapott kép „laposnak” tűnhet.

### d. Y-moduláció

Az Y-modulációt akkor kapjuk, ha a detektorból kapott jelet visszavezetjük az y-irányú (függőleges) eltérítésre. Ennek előnye, hogy olyan kis kontrasztértékeket tudunk észlelni, amit fényességmoduláció esetén szemmel már nem lenne érzékelhető.


## 3. Képmegmunkálás

Digitális képmegmunkálással minden olyan művelet, amit végre tudtunk hajtani analóg esetben megtehető, sőt ezeken felül is. A digitális képből gyorsan előállítható az úgynevezett intenzitáshisztogram, ami azt mondja meg, hogy az egyes szürke árnyalatokat mennyire használtuk

ki. Ebből a hisztogramból hamar kiderül, ha nem vettük igénybe az összes árnyalatot, és digitálisan utólagosan beállíthatjuk a kontrasztot, hogy a skála egészét kihasználjuk. A képet színezni is lehet, ez azért hasznos, mert a szem a szürke árnyalatokhoz képest sokkal több színt tud megkülönböztetni.

A mikroszkóp jeleiből nyert digitális kép diszkrét pontokból áll, így lényegében a leképezés egy intenzitásmátrix. A képmegmunkáláshoz is diszkrét értékeket használunk, úgynevezett kernel operátorokat, ami nem más, mint egy páratlan oldalhosszú négyzetes mátrix. A feldolgozás során ezt a kernel operátort a digitális kép bal felső sarkába tesszük, az egymáson lévő értékeket összeszorozzuk, majd ezeknek az összegét beírjuk egy új mátrixba. Majd megyünk tovább egy oszloppal és ott is elvégezzük ezt, odáig folytatjuk, míg el nem érünk a jobb alsó sarokba, ügyelve arra, hogy a kijelezhető maximális intenzitásértéket ne haladjuk meg. Az így kapott mátrix kisebb lesz, mint az eredeti kép.

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 5 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |



|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 20 | 23 | 21 | 20 | 18 |
| 33 | 34 | 28 | 23 | 17 |
| 31 | 31 | 29 | 27 | 24 |
| 24 | 26 | 25 | 25 | 23 |

Simítással a képről a zajokat tudjuk eltüntetni, de ezzel óvatosan kell bánni, mert az élek is elmosódhatnak, műtermékek keletkezhetnek, amiből hibás következtetéseket vonhatunk le. A simításra többféle operátor is létezik, a legegyszerűbb a blokk-kernel, ami csupa egyesből áll és lényegében egy átlagolást végez az adott területen. A gauss kernel a normális eloszlást követve végzi el a simítást. A kernel sarkaiban egyesek állnak, a mellettük lévőkben nagyobb számok, azok mellett még nagyobb, és közepén pedig a legnagyobb. Ez a miatt jó, hogy nagyobb súllyal veszi figyelembe, hogy mi volt azon a ponton az eredeti képen. A mediánszűrő is simításra, zajszűrésre használják, de itt a kernel alatti

értékek nem adódnak össze, hanem csak a mediánjukat írjuk be az új mátrixba.

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Sátor kernel

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 1 |
| 2 | 4 | 2 |
| 1 | 2 | 1 |

Gauss kernel

A zajszűrés nagyon fontos előfeltétel az éldetektáláshoz. Ha zajos képen akarunk éleket detektálni, akkor a zajokat is mind élnék fogja érzékelni a program, és nem a valós éleket találjuk meg. Éldetektálásra használt kernel a Sobel szűrő. A pásztázás irányától függően a kernel egyik oldalán negatív a másikon pedig pozitív számok állnak, ahogy ezt végig húzzuk a képen az éleket sokkal jobban felerősíti, mint minden mást, de csak az egyik tengely mentén. Ha a 90°-al elforgatott kernellel is végig csináljuk, akkor a Pitagorasz-tétel segítségével a két eredményből megkaphatjuk a minden élt tartalmazó képet.

|    |   |   |
|----|---|---|
| -1 | 0 | 1 |
| -2 | 0 | 2 |
| -1 | 0 | 1 |

X komponens

|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -2 | -1 |
| 0  | 0  | 0  |
| 1  | 2  | 1  |

Y komponens





Sobel



Median



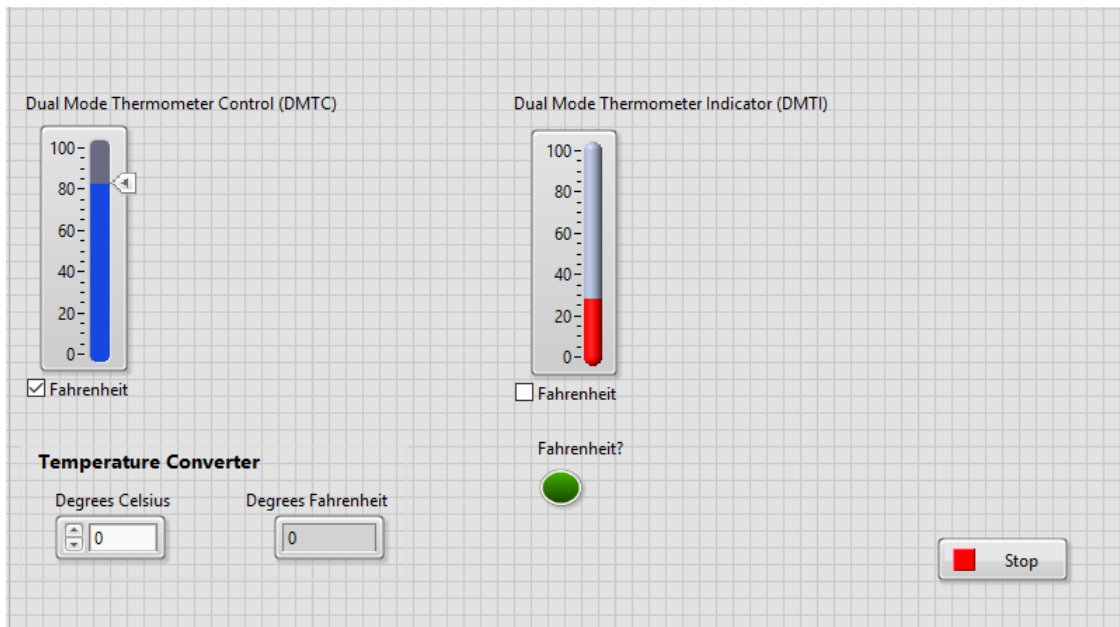
Sobel



## IV. LabVIEW

A LabVIEW elnevezés a Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench szavakból jön, a National Instruments (továbbiakban csak, NI) által fejlesztett FPGA programozására alkalmas grafikus programozási felület. A LabVIEW-ban írt programokat Virtual Instruments-nek vagy csak röviden VI-nak hívják. Ez két fő részből áll, az egyik a front panel, a másik a blokk diagramm.

### 1. Front panel

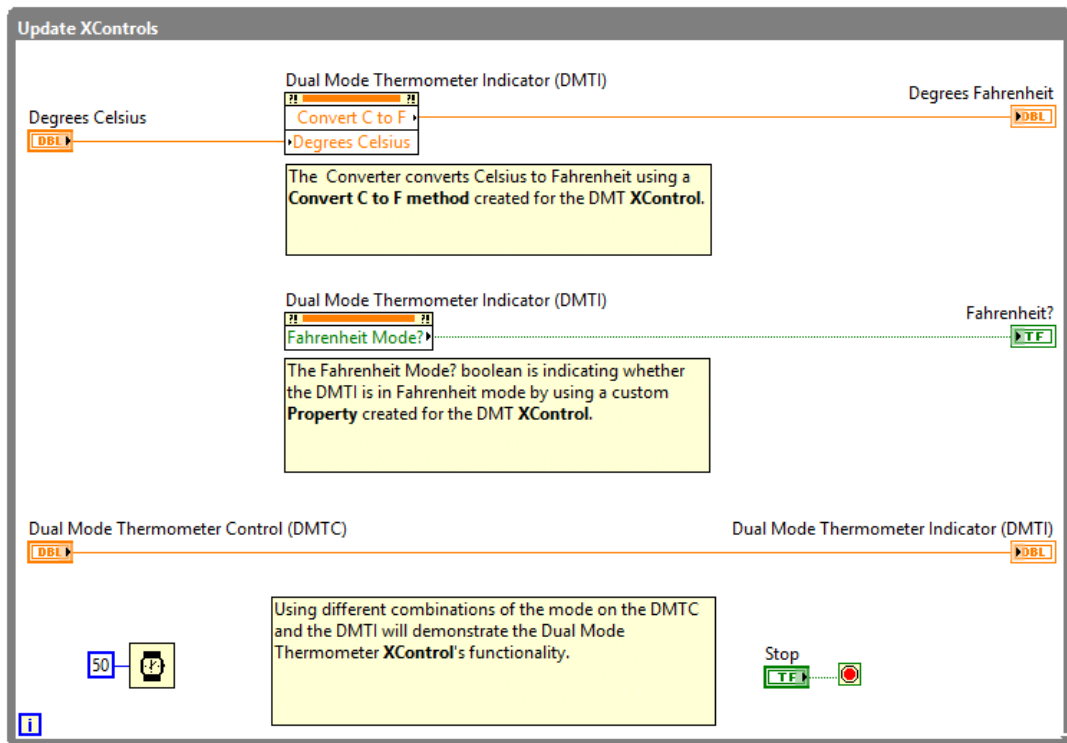


A front panel lényegében a VI felhasználói/kezelő felülete. Erre a felületre sokféle visszajelző és mutató közül választhatunk, annak függvényében, hogy éppen mit akarunk kijelezni. Például: gráfok, LED-ek és egyéb visszajelzők, amik a blokk diagramm kimeneti adatait és változóit hivatottak megjeleníteni.

Emellett kontrol eszközöket is tudunk hozzáadni a felülethez. Például: nyomógombok, potméterek, csúszkák, ezek a virtuális eszköz bemeneti jeleit és irányító mechanizmusát kívánják szimulálni a blokk diagramm felé.

Ezek között böngészni a control palette nevű ablakban lehet.

## 2. Blokk diagramm



A blokk diagramm tartalmazza a G kódnak vagy blokk diagramm kódnek hívott grafikus forráskódot, ami azt mondja meg, hogy hogyan fusson le a VI. Ez egy grafikus reprezentációja azoknak a funkcióknak, amik vezérlik a front panelen lévő eszközöket. Ezeknek a kis iconjai megjelennek a blokk diagrammon, ahol a vezetékekkel összeköthetjük a kontroll és az indikátor eszközöket a funkciókkal.

Az adat a következőképpen megy a vezetékeken: a kontroll eszközökből a funkciót megvalósítókba és az indikátorokba, a funkciókból további funkciókba, illetve indikátorokba. A VI-ban található grafikus kód végrehajtási sorrendje is e mentén fut.

# Irodalomjegyzék

- [1] Pozsgai I. (1995): A pásztázó elektronmikroszkóp és az elektronsugaras mikroanalízis alapjai
- [2] National Instruments (2013) LabVIEW: Getting started with LabVIEW  
URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373427j.pdf> 2018.11.17.
- [3] Sobel I. (2014): History and Definition of the so-called „Sobel Operator”, more appropriately named the Sobel-Feldman Operator  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/239398674\\_An\\_Isotropic\\_3x3\\_Image\\_Gradient\\_Operator](https://www.researchgate.net/publication/239398674_An_Isotropic_3x3_Image_Gradient_Operator) 2018.11.24.
- [4] Fisher R., Perkins S., Walker A., Wolfart E. (2003): Laplacian/Laplacian of Gaussian  
URL: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/log.htm> 2018.11.24.