



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Elektronikus Eszközök és Hardver szekció

TDK DOLGOZAT

**Nanotechnológiai eljárás kidolgozása UV hullámhossztartományban  
működő, integrált fotonikus komponensek előállításához**

Készítette:

**Szegedi Domonkos**

Fizikus MSC, Orvosi Fizika szakirány

Témavezetők:

**Dr. Fekete Zoltán**

(MTA EK MFA NAP B Implantálható Mikrorendszerek Kutatócsoport),

**Dr. Lukács István Endre**

(MTA EK MFA)

Budapest, 2016. október 25.

## Tartalom

Összefoglaló.....	3
Abstract .....	4
1. Bevezetés.....	5
2. Irodalom és háttérismeretek áttekintése.....	6
2.1 Idegi stimuláció elektromágneses sugárzással.....	6
2.1.1. Termogenetika .....	7
2.1.2. Optogenetika .....	7
2.2. Optikai hullámvezetők és csatoló rácsok .....	8
3. Alkalmazott kísérleti módszerek és használt berendezések .....	13
3.1. A kísérleti minták atomi rétegleválasztás és fotolitográfia segítségével .....	13
3.2. Elektronsugaras litográfia és pásztázó elektronmikroszkópia .....	17
3.3. Vékonyréteg leválasztás fizikai gőzfázisú leválasztóval.....	24
3.4. Száraz marás .....	26
3.5. Atomi erőmikroszkópia .....	28
3.6. Lift-off technika .....	30
3.7. Nedves marás .....	31
4. Végzett vizsgálatok, kapott eredmények és a kidolgozott technológiai folyamat .....	32
4.1. Reziszt vizsgálata .....	33
4.2. EBL dózis vizsgálata .....	35
4.3. Marási sebesség vizsgálata.....	41
4.4. Rácsmintázat és kitöltési arányra vonatkozó további vizsgálatok .....	44
4.5. Optikai megfontolások .....	47
4.6. A technológiai folyamat .....	48
5. Összegzés, kitekintés .....	49
Köszönetnyilvánítás.....	50
Ábrajegyzék .....	51
Hivatkozások.....	53

## Összefoglaló

Az agy mikroskálán történő jellemzéséhez használt mérés technika komoly technológiai háttérrel rendelkezik. Az MTA EK NAP B Implantálható Mikrorendszerek kutatócsoport, melyben a jelen dolgozat is készült mikro- és nanotechnológiai eljárásokkal állít elő olyan eszközöket, melyek ezt az igényt hivatottak kielégíteni.

A sejtszintű kutatások egyik általános módja az idegsejtek lokális ingerlése, majd a kiváltott válasz regisztrálása elektromos potenciálváltozás formájában. Az ingerlés történhet többféleképpen, az ultrahang sugárzással történő gerjesztés nanotechnológiát igénylő megvalósítása miatt az utóbbi időben került a kutatás előterébe.

A munka távlati célja olyan mikroeszköz megvalósítása és optikai tesztelése, mely idegszövetbe ültetve 310 nm-hez közeli hullámhosszú fénystimulusokat képes a szövetbe integrált módon becsatolni, ezáltal lokálisan elősegíteni különböző azidált molekulák bekötődését. A jelen munka során atomi rétegleválasztás (ALD), lift-off technika és elektronsugaras litográfia (EBL) kombinálásával dolgoztam ki egy technológiai folyamatot. Ennek lényege, hogy olyan be- és kicsatoló rácsokkal ellátott hullámvezető struktúra kialakítása lehetséges, mely a fenti hullámhossz tartományban egy szálcsatolt lézerforrásból megfelelő hatásfokú becsatolást tesz lehetővé.

Az egyes technológiai lépések paramétereinek hatását pásztázó elektronmikroszkópiával (SEM) és atomerő mikroszkópiával (AFM) jellemeztem. Az így optimalizált eljárással olyan mintákat hoztam létre, melyekkel optikai mérések is végezhetők. Ezen minták előállításához már a BME TTK Atomfizika Tanszék munkatársaival együttműködve szimulációs eredményeket is felhasználtam.

A dolgozat első részében röviden áttekintem az elektromágneses hullámmal történő gerjesztés történeti, valamint az ehhez szükséges csatoló rácsok elméletének fizikai háttérét. Ezt követően bemutatom az alkalmazott technikákat, a mintakészítés folyamatát, a mérési berendezéseket, valamint a kidolgozott technológiai folyamatot. Végül bemutatom a kidolgozott folyamat egyes lépéseinek technológiai optimalizálására vonatkozó eredményeimet.

## Abstract

Microscale investigation of the brain requires precisely fabricated measurement tools providing high spatial and temporal resolution. To meet these requirements, the MTA EK NAP B Research Group for Implantable Microsystems, where the author of this thesis worked, devotes its efforts to fabricate multifunctional neural implants using micro- and nanotechnology.

One way to investigate the function of nerve cells is to first apply local excitation and then record the evoked electrical signals generated in the tissue. The excitation can be accomplished in different ways. The use of ultraviolet radiation came into forefront of brain research in the recent years due to the requirements of nanoscale precision in device fabrication.

The long-term objective of our research is to produce and test a microdevice implanted into the nerve tissue, that can couple light stimulus at cca. 310 nm in wavelength into the tissue in an integrated way, and thereby it can help the bonding and decay of several azidated molecules in spatially controlled manner. In this work, a process using atomic layer deposition (ALD) and lift off technique combined with electron beam lithography (EBL) will be described. The developed process facilitates to produce a nanoscale surface structure like in- and outcoupling optical gratings on thin film optical waveguides. This way, coupling light from a laser source, attached to an optical fibre, will be possible with an appropriate yield.

The morphological investigation of the effect of several process parameters were performed using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). Based on the measurements, the fabrication steps were optimized and samples suitable for optical validation were designed and produced. The design was aided by simulation results provided by collaborators of the Department of Atomic Physics, Budapest University of Technology and Economics.

In the first part of the thesis, a brief overview of the historical aspects of exciting nerve cells will be given and the physical background of grating couplers theory will be introduced. In the second part, the applied techniques, the production of the samples, the used technology facilities and the optimized process flow will be described in details. Finally, the results of process development will be explained.

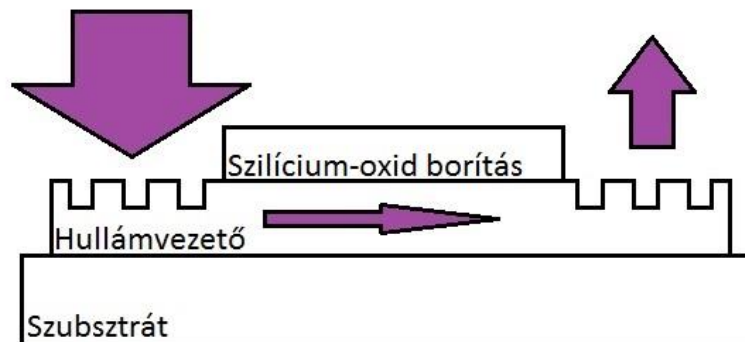
## 1. Bevezetés

Korunkban komoly társadalmi problémát okoznak az idegrendszeri eredetű betegségek, melyek sokszor nehezen vagy egyáltalán nem gyógyíthatók. Ezek hatékony kezelésének igénye révén az agykutatás mögött jelentős társadalmi motiváció is húzódik. Ez tette többek között lehetővé a tudományág és a kutatáshoz kapcsolódó technológia utóbbi időben tapasztalható ugrásszerű fejlődését. A sejtszintű kutatáshoz szükséges méréstechnika, a nano- és mikrotechnológia jelenlegi állása már olyan módszereket is lehetővé tesz, mint például a lab-on-a-chip technika, ahol egy mikroeszközön több szenzorikus, illetve sejtekre különféle hatást kifejtő elem található meg integráltan.

Az idegrendszer sejtszintű kutatása esetében ez például az ingerlésére alkalmas és a sejtek reakciójának regisztrálását végző komponensek egy elektródon történő elhelyezését jelentheti. Az ingerlés történhet többféleképpen (például mechanikus, hőmérsékleti, elektromos úton vagy elektromágneses spektrum bizonyos tartományában található sugárzás formájában), illetve a vizsgált válaszreakció típusa is lehet eltérő (például sejtek kitapadása, hőmérsékletváltozás, elektromos potenciál változás). Az MTA EK NAP B Implantálható Mikrorendszerek Kutatócsoport ilyen jellegű vizsgálatokra alkalmas, úgynevezett nano- és mikroelektromechanikai rendszerek fejlesztésén dolgozik. A TDK munkám során ebbe a folyamatba kapcsolódhattam be, illetve az elméleti és technológiai háttérbe nyerhettem bepillantást.

Az idegsejtek feljebb írt vizsgálatának egy lehetséges módja az UV sugárzással indukált azidált molekulák lokális bekötődése, majd a környező idegsejtek elektromos válaszána mérése. Az ingerlés történhet a lágy ultraibolya sugárzás segítségével felszabadított neurotranszmitterek segítségével is [1]. Ennek kísérleti megvalósítása történhet úgy, hogy egy forrásból optikai szállal az UV fénysugarakat becsatoljuk egy hullámvezetőbe, mely az elektródon van elhelyezve, majd a hullámvezető másik végén kicsatoljuk a fényt [3, 5]. Kicsatolási pont környezetében az elektródára helyezett mérő kontaktusokkal, valamint elvezetések segítségével mérjük az elektromos válaszjelet. Hullámvezetők elektródákra történő integrálásának irodalma, az optikai csatolórácsokéhoz hasonlóan kiterjedt [3-9, 16]. A nehézséget többek között az optikai kábel és a hullámvezető közötti csatolási veszteség okozza, mely a szál és a hullámvezető módusainak méretkülönbségből adódó jelentős eltéréséből adódik [3, 10]. További hatásfok csökkenést okozhat a hullámvezetőből történő kicsatolásakor és a hullámvezető mentén történő terjedéskor keletkező veszteség, melyek jelentősek lehet. Emellett a minta UV hullámhossztartományban való működéséhez szükséges nanoskálás megmunkálás speciális technológiát igényel.

A munkám során a fent írt rendszernek egy egyszerűsített modelljének előállítását vizsgáltam. Ennek részeként egy olyan eljárást dolgoztam ki, mellyel szilícium hordozón található alumínium-oxid hullámvezető végein hozhatók létre be- és kicsatoló rácscok. Ezeket a mintákat jellemeztem, és optimalizáltam a folyamatot, hogy a továbbiakban végzett optikai mérésekben az elérni kívánt biológiai hatáshoz megfelelő teljesítményt tudjunk transferálni egy optikai kábelből a hullámvezető másik végének környezetébe. Célom az volt, hogy ezzel az egyszerűbb elrendezéssel a fenti bonyolultabb (legyártott elektródák esetén in vivo) kísérlet koncepciójának egyfajta igazolását adjam.



1. ábra. Egyszerűsített kísérleti elrendezés

Számos egyéb biológiai anyag belső átmeneti energiája is a láthatóhoz közeli ultraibolya tartományban található (egyes fehérjék, DNS, lipid kettősrétegek), így az eredmények más területen történő alkalmazása is lehetséges [11].

## 2. Irodalom és háttérismeretek áttekintése

### 2.1 Idegi stimuláció elektromágneses sugárzással

Az idegrendszer működésének vizsgálata több szinten történhet. Az agy makroskálán történő tanulmányozására gyakori eljárás a PET, illetve fMRI berendezések használata [12], melyekkel egyes agyi területek megnövekedett aktivitása vizsgálható kontrasztanyagok segítségével. Ilyen aktivitás növekedés lehet különféle behatásokra (képi információ, hanghatás, egyéb érzékszervi ingerek, stb.) történő reakciók következményei. Ezek az agy egy holisztikusabb, magasabb szintű működéséről adnak információt.

Mikroskálán történő vizsgálat esetén egyes idegsejtek, kisebb sejtcsoportok viselkedése tanulmányozható, az agy sejtszintű működéséről, különféle ingerekre történő válaszreakcióiról, az elektromos potenciál sejtek közötti terjedéséről nyerhetünk információt. Az egyes behatások úgy, mint a megfigyelt válaszreakciók is lehetnek különfélék. Az idegsejtekben vizsgálható többek között a szövetrel határos felület anyagi minősége, vagy strukturáltsága (érdeessége), ami nagy hatással lehet

például a sejtek megtapadására. Az agyi elektródákkal való mérések esetén ezért (invazív eljárás) az elektródák biokompatibilitása is egy fontos szempont [2].

A sejszintű kutatások számottevő részében valamilyen külső inger hatására közvetlenül vagy közvetetten bekövetkező akciós potenciálokat mérjük. Ez a mérési módszer hosszú múltra tekint vissza, komoly elméleti és technológiai háttérrel.

A sejtes ingerlésnek a kezdetektől mindmáig jelentős részét képezte az elektromos stimuláció [33]. Különböző elektródákkal mind a központi, mind a perifériás területek stimulálása lehetséges. A módszer nehézségei többek között a térbeli felbontása, az ingerlés szelektivitásának hiánya, illetve az eljárás bizonyos fokú invazivitása. Az elektróda behelyezésén túl, ugyanis apróbb kislésések hatására az idegsejtek károsodhatnak is [1]. Ezek a problémák küszöbölhetőek ki bizonyos mértékben optikai stimuláció segítségével, melynek az ingerlő sugárzás hullámhossza szerint több fajtáját különböztetjük meg.

#### 2.1.1. Termogenetika

Az elektromágneses sugárzással való ingerlést optikai stimulációnak nevezzük általánosan, noha ez a kifejezés nem csak a látható hullámhossztartományra vonatkozik. Az infravörös tartományban történő stimuláció neve termogenetika (vagy thermogenetics), minthogy egyfajta hőszugárzásként is tekinthetünk rá.

Az eljárás másik megnevezése az infravörös idegi stimuláció (INS-infrared neural stimulation). Jellemzője, hogy nem igényel közvetlen kontaktust, sem elektrokémiai összeköttetést a sugárforrás és a szövet között az elektromos ingerléssel ellentétben, valamint jobb térbeli felbontás érhető el vele [1]. Esetleges áthallásból eredő műtermékek sem jelentkeznek, ami az elektromos ingerlésnél abból adódhat, hogy a stimulációt, és a válaszreakció regisztrálását is elektródákkal végezzük. Hátránya, hogy a sugárzás hőhatása révén – bizonyos küszöbértéket meghaladva - kárt is okozhat a szövetben, valamint a stimuláció mélysége korlátozott, mivel a szövetben néhány száz mikrométeren belül elnyelődik [1]. Ezek a hatások a hullámhossz csökkentésével erősödnek.

#### 2.1.2. Optogenetika

Bár az optikai stimulációkat is szokásos közösen optogenetikának hívni, azonban ez a kifejezés a látható tartományba eső fényvel történő gerjesztésre, ill. gátlásra vonatkozik. A stimuláció közvetett úton történik. A célra egy széles körben használt molekulát, a ChR2 (Channel-rodopszin-2) fehérjét, mint ioncsatornát sejt-specifikusan juttatnak be a vizsgált alanyba. Az így érzékenyített sejtmembránban kék fényvel (jellemzően 470 nm körül) váltható ki szelektíven akciós potenciál. Nem csak a fehérje és ezzel együtt az idegsejt aktiválása, hanem gátlása is elérhető, ez a fényforrás stimulációs frekvenciájától függ

[13]. További opszinok lehetővé teszik egyéb hullámhosszok használatát az optogenetikában (például VChR1 – 589 nm, ReaChR – 610 nm) [1]. Mivel a hullámhossz még kisebb, mint az infravörös idegi stimuláció esetében, így mélyebb agyi régiók ingerlése ebben az esetben is limitált. A még rövidebb penetrációs mélység azonban éppen ezért jobban lokalizálható gerjesztést eredményez, ami jobb térbeli felbontáshoz vezet. Hátránya, hogy a sejtmembránt előzetesen, virális úton érzékenyíteni kell, melynek mellékhatásai egyelőre nem feltártak még.

## 2.2. Optikai hullámvezetők és csatoló rácsok

A munkám során vizsgált alaprendszer egy hullámvezető struktúra, be- és kicsatoló rácsokkal ellátva. Ahhoz, hogy a rendelkezésre álló technológiával a kísérletekhez alkalmas mintákat tudjunk előállítani fontos, hogy tisztában legyünk a rendszerünk működésének elméleti hátterével. Mind a hullámvezetők, mind pedig az optikai csatolórácsok elmélete jól kidolgozott az elektromágneses alapegyenletekből levezethetők. A következőkben csak egy vázlatosabb áttekintést, valamint a számunkra relevánsabb összefüggéseket emelem ki [3, 5, 6, 14].

Izotróp, nem vezető és nem mágneses,  $n$  törésmutatójú közegre felírva a Maxwell-egyenleteket a következőt kapjuk:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 \nabla \cdot (n^2 \mathbf{E}) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

Az (1) és (2) egyenletek rotációját képezve, majd a kapott egyenletek jobb oldalán kihasználva az idő szerinti parciális derivált, valamint a rotáció felcserélhetőségét, a következő összefüggést:  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{V}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{V}) - \Delta \mathbf{V}$ , illetve a gradiens operátorra vonatkozó szorzat deriválási szabályt kapjuk az elektromos térerősségre az alábbi kifejezést:

$$\Delta \mathbf{E} + \nabla \left[ \frac{(\nabla n) \mathbf{E}}{n^2} \right] - \varepsilon_0 \mu_0 n^2 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{E} + \nabla \left[ \frac{(\nabla n) \mathbf{E}}{n^2} \right] - \varepsilon_0 \mu_0 n^2 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

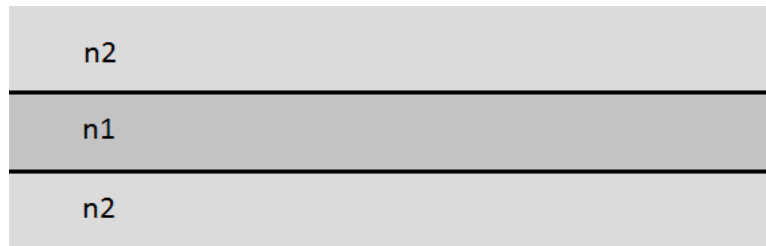
A mágneses térerősségre vonatkozó egyenlet ugyancsak levezethető ily módon, és hasonló alakú. Homogén közegben, ahol a törésmutató gradiense eltűnik, a kapott alak a hullámegyenlet, megoldása pedig mágneses és elektromos terekre vonatkozóan:



$$\mathbf{E} = \mathcal{E}(\mathbf{r})e^{i(\omega t - \beta r)} \quad (7)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{h}(\mathbf{r})e^{i(\omega t - \beta r)} \quad (8)$$

ahol  $\omega$  a tér oszcillációjának körfrekvenciája,  $\beta$  pedig az úgynevezett terjedési állandó vektora (ami vákuumban való terjedésre a hullámszám vektorral egyezik meg, általános esetben pedig az egyes térerirányokban történő terjedés törésmutató-függő periodicitását jellemzi). Alkalmazhatjuk a kapott eredményt a hullámvezetőnek egy egyszerűsített esetére, ahol egy  $n_1$  törésmutatójú,  $d$  vastagságú síkot határoljon két  $n_2$  törésmutatójú féltér.



2. ábra. Sík hullámvezető modell

Legyen a határoló síkokra merőleges irány az  $x$ , a kapott megoldások felírhatók kettő lineáris kombinációjából, amikor az elektromos térerő van az  $y$  síkban, illetve amikor a mágneses tér. A két megoldás további vizsgálat szempontjából nagyon hasonló, ezért vizsgáljuk tovább az előbbi esetet, amit transzverz elektromosnak (TE) is neveznek. Ekkor a hullámegyenletekre kapott megoldást az (1), (2) képletekbe helyettesítve adódik az elektromos térerősség  $y$  komponensére a következő egyenlet:

$$\frac{d^2 \mathcal{E}_y}{dx^2} + [\omega^2(\epsilon_0 \mu_0) n^2 - \beta^2] \mathcal{E}_y = 0, \quad (9)$$

ahol  $\omega^2(\epsilon_0 \mu_0)$  szorzatot gyakran  $k_0$ -al jelölik. Az egyenlet megoldása a szögletes zárójelben levő kifejezés előjelétől függően a trigonometrikus függvények (pozitív érték esetén), illetve exponenciális függvények (negatív érték esetén) lineáris kombinációja. Számunkra releváns eset a vékony hullámvezetőben oszcilláló, valamint a környező,  $n_2$  törésmutatójú térben lecsengő megoldás. Ebből a következő feltétel adódik:

$$\omega^2(\epsilon_0 \mu_0) n_2^2 < \beta^2 < \omega^2(\epsilon_0 \mu_0) n_1^2, \quad (10)$$

azaz a hullámvezető törésmutatójának nagyobbak kell lennie, mint a környező anyagnak.

Másrészt a trigonometrikus és exponenciális függvények lineáris kombinációjával kapott megoldások most nem részletezett módon felbonthatók az  $x=0$  síkra nézve szimmetrikus és aszimmetrikus tagokra (trigonometrikusok esetében ezek egyszerűen rendre a koszinusz, illetve szinusz függvények), majd ezen tagokra külön felírva a tér folytonosságára vonatkozó határfeltételt ( $|x|=d/2$  közezhatárokon a megoldások az egyes közegekben egyezzenek meg) kaphatjuk meg a hullámvezető által vezetett módusokra vonatkozó feltételeket:

$$\frac{(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)d}{2} \tan\left(\frac{(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)d}{2}\right) = \frac{(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)d}{2}, \quad (11)$$

valamint

$$\frac{-(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)d}{2} \cot\left(\frac{(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)d}{2}\right) = \frac{(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)d}{2} \quad (12)$$

Az egyenletek bal oldalán szereplő szögfüggvények argumentumát  $X$ -nek elnevezve (nagy  $X$ -szel jelölöm azért, hogy ne legyen megzavaró a korábbi koordináta  $x$  elnevezés miatt), valamint a jobb oldalon történő kisebb átalakítással kapjuk a szimmetrikus és aszimmetrikus módusokra rendre a következő feltételeket:

$$X \tan(X) = \left( \frac{k_0^2 d^2 (n_1^2 - n_2^2)}{4} - X^2 \right), \quad (13)$$

illetve

$$-X \cot(X) = \left( \frac{k_0^2 d^2 (n_1^2 - n_2^2)}{4} - X^2 \right) \quad (14)$$

a módusok számát tehát a bal oldali lineáris\*tangens függvény, valamint a jobb oldali, kört leíró függvény metszéspontjai adják. Minél nagyobb a kör sugara, annál több metszéspont, azaz vezetett módus van. Látható tehát, hogy minél vastagabb a közeg, annál több módust vezet a hullámvezető, és hasonlóan nő a módusok száma a hullámhossz csökkenésével ( $k_0$  értéken keresztül közvetten). A harmadik befolyásoló tényező a hullámvezető és az azt körülvevő közeg törésmutatójának különbsége, aminek növekedésével a vezetett módusok száma szintén nő.

Amikor realiztikusabb eseteket akarunk vizsgálni óhatatlanul is numerikus módszereket, vagy közelítéseket kell alkalmaznunk. Gyakori esetben a hullámvezető nem egy végtelen sík, hanem két dimenzió mentén véges, kisebb mérettel rendelkezik, és a harmadik hosszirányú dimenzióban nagyobb, praktikusán végtelennek tekinthető. Mivel egy Gauss-függvény profilja és egy

lépcsőfüggvény szerint változó törésmutatójú hullámvezető közegben a transzverz módusok amplitúdóprofilja jó közelítéssel megegyezik [15], így egy általánosabb hullámvezető módusai jól becsülhetők a Marcatili-módszerrel [15]. Ennek lényege, hogy a hullámvezetőre, illetve törésmutató térbeli változására úgy tekint, mint egy téglalap keresztmetszetű hasáb (ezen belül adott értékű a törésmutató, rajta kívül pedig ettől eltérő, szintén konstans). Ekkor, mivel a módus nagyrészt a hullámvezetőre korlátozódik, a környező közegben exponenciálisan lecsengve, valamint az alábbi ábrán  $S$  betűvel jelölt térfogatban a tér annyira kicsi, hogy nem kell figyelembe vennünk. Alkalmazhatunk olyan közelítést, ahol a rendszert két sík hullámvezető rendszernek tekinthetjük horizontális, illetve vertikális irányban [15]. Ekkor a hullámvezető közegre egy effektív törésmutatóval tudjuk számolni a vezetett módusokat. Ennek számítása részletesen van taglalva több helyen [9,15].

A mi esetünkben már a sík hullámvezető közelítés is releváns információval szolgálhat, mivel a keresztmetszeti dimenziók aránya is több nagyságrend, esetünkben akár nagyobb, mint  $10^2$ .

Definíció szerint egy optikai szál is hullámvezető, levegővel vagy adott törésmutatójú borítással körülvéve, azonban a fogalom alatt a nano- és mikro-elektromechanikus rendszerek esetén többnyire valamilyen hordozón, hullámvezetéshez alkalmas tulajdonságú anyagból létrehozott vékony- vagy vastagréteg struktúrát értjük. Láthattuk, hogy a vezetett módusok elsődleges feltétele, hogy a hullámvezető nagyobb törésmutatóval rendelkezzen, mint a környező anyag. Azonban ekkor a teljes reflexió miatt az okozhat gondot, hogy a fényt becsatoljuk a hullámvezetőnkbe, illetve a kívánt ponton kicsatoljuk belőle. Gondoskodnunk kell tehát tipikus esetben arról, hogy egy szálcsatolt optikával a forrásból a hullámvezetőhöz vezetett fényt a hullámvezetőbe megfelelően becsatoljuk. Erre a technológia fejlődésével több lehetőség is kínálkozik.

Élcsatolásnak nevezzük, amikor az optikai szálát hosszanti irányban, horizontálisan illesztjük a hullámvezetőnk keresztmetszeti síkjához. Egy speciális technika az evaneszcens csatolás, amikor az optikai szál környezetében lecsengő hullámot csatoljuk a hullám vezetőbe [5]. A számunkra relevánsabb, és általam is használt módszer a csatoló rácsok alkalmazása, amikor a fény merőlegesen (vagy adott szögben, ami praktikusán kicsi) érkezik a felületre, amin a kívánt terjedési irányra a horizontális síkban merőlegesen található sávok optikai rácsként diffrakció elvén csatolják az elektromágneses hullámokat a hullámvezetőbe.

Abban az esetben, ha a csatoló rácsra eső párhuzamos fény nem merőleges a rács síkjára, hanem a beesési merőlegessel  $\theta$  szöget zár be, akkor az effektív törésmutató és a Bragg-feltétel (jelen diffrakció esetén a rács síkjában a hullámszámvektor komponensek, illetve terjedési együtthatók előjeles összege a határfelület két oldalán meg kell egyezzen) alkalmazásával az alábbi összefüggés írható fel [3, 8, 17]:

$$n_{eff} = n_{top} \sin(\theta) + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (15)$$

ahol  $n_{top}$  a hullámvezető csatoló rács felőli oldalával határos közeg törésmutatója (tipikus mérési elrendezésben ez fentről történő megvilágítás miatt kapta a „top” nevet),  $\lambda$  a beeső fény hullámhossza,  $\Lambda$  a csatoló rács periódusa,  $m$  pedig a becsatolni kívánt diffrakciós rend indexe. Az effektív törésmutatóból a hullámvezetőben történő hullámterjedés terjedési állandója az effektív törésmutatóból az alábbi módon számolható [5, 21]:

$$\beta_m = n_{eff} \frac{2\pi}{\lambda} \quad (16)$$

Behelyettesítve a (15) egyenletbe, és átrendezve kaphatjuk:

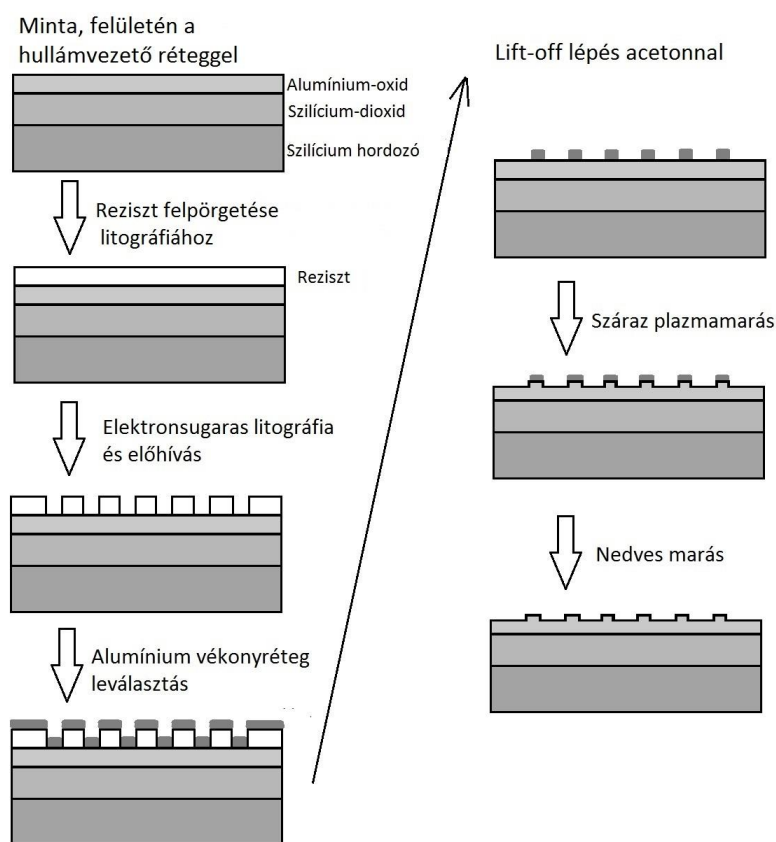
$$n_{top} \sin(\theta) \frac{2\pi}{\lambda} + m \frac{2\pi}{\Lambda} = \beta_m \quad (17)$$

Ennek a terjedési együtthatónak kell megegyeznie a hullámvezető vezetett módusait jellemző terjedési együtthatók valamelyikével. Hogy minél nagyobb teljesítményt tudjunk a hullámvezetőbe csatolni, minél alacsonyabb diffrakciós rendek terjedési együtthatóira kell kielégíteni a feltételt. Ez azt jelenti, hogy adott terjedési együttható és adott hullámhosszúságú forrás esetén a beesési szög csökkentésével, valamint a csatoló rács periódusának növelésével tudjuk a terjedési együtthatóhoz tartozó diffrakciós rend értékét csökkenteni. A hullámvezetőt fedő közeg törésmutatóját mi esetünkben adottnak tekintjük.

A technológiai gyártás számára adott anyagok (törésmutatók), valamint a használni kívánt forrás (hullámhossz) mellett a csatoló rácsokkal ellátott hullámvezető vastagságával, a csatoló rácsok periódusával, és már az optikai mérés esetén a fénysugár beesési szögének változtatásával tudjuk finomhangolni a TDK munka során vizsgált egyszerűsített optikai rendszerünket. Az elméletben kiszámolt és megtervezett struktúrák megvalósításakor azonban további limitációkkal kell számolnunk. A következőkben ezért áttekintem az előállításához szükséges, és munkám során is használt berendezéseket és kísérleti módszereket.

### 3. Alkalmazott kísérleti módszerek és használt berendezések

A rácsmintázat hullámvezetőbe történő leképezését marási módszerekkel terveztük elérni. Ehhez egy maszkoló vékonyrétegben szükséges a rácsmintázatot kialakítanunk. Mivel a rács karakterisztikus mérete (periódus) száz nm nagyságrendbe esik, ezért fotolitográfiát a felbontás korlátai miatt már nem tudunk használni, az elektronsugaras litográfia ellenben alkalmasnak bizonyult erre. Az elektronsugaras litografáláshoz használt PMMA alapú rezisztet a későbbiekben is részletezett módon nem tudtuk a maráshoz maszkként használni, ezért további technikákat is alkalmaznunk kellett egy bonyolultabb folyamat részeként. A tervezett eljárást a 3. ábrán látható keresztmetszeti folyamatsor szemlélteti, az egyes technikák a következőkben kerülnek részletezésre.

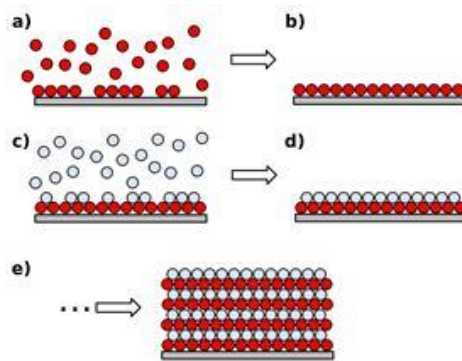


3.ábra. A tervezett technikai lépéssorozat

#### 3.1. Kísérleti minták előállítása

A megfelelő intenzitású optikai stimulációhoz, de a biológiai és kémiai szenzorok magas érzékenysége szempontjából is elengedhetetlen a jó fényterjedési hatások, illetve alacsony veszteség. A látható tartományban különféle fém-oxidok (például  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) megfelelőnek bizonyultak a célra relatíve magas törésmutatójuk miatt, azonban az UV tartományban, vagy akár csak közel ultraibolya

fényre ezek többsége már nem használható. Az alumínium-oxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) megfelelő rétegleválasztási technika mellett alkalmas lehet UV tartományban működő hullámvezetőnek [11]. A rétegleválasztási módszer azért kritikus, mert ebben a hullámhossztartományban sok technika a ponthibák (például buborék), felületi érdesség, illetve nem megfelelő sztöchiometriai arányok miatt akkora veszteséget eredményeznek, ami az adott technika használhatatlanságához vezet. Az irodalomban közölt - akár egészen 250 nm hullámhosszig működő hullámvezetők előállításához használt - gyártási módszer az atomi rétegleválasztás (ALD – atomic layer deposition) [5, 10]. A további megmunkálásra szánt mintákat (hordozón található hullámvezető) is atomi rétegleválasztással hozták létre az MTA EK MFA Mikrotechnológiai Laboratóriumában, ahol a TDK munkámat végeztem.



4.ábra Atomi rétegleválasztás elve [30]

Az ALD egy kémiai gázfázisú vékonyréteg leválasztási technika. Alapelve a prekursorok felváltva történő reakciója a felülettel. A prekursorok azok a forrásanyagok, melyeket felváltva a felületre juttatva, azon atomi vastagságú monorétegeket hoznak létre a felülethez történő kötődéssel, ami a telítődésbe megy. Ez az önszabályozó növekedés teszi lehetővé a monorétegenként szabályozható rétegvastagságot. Egy rétegleválasztási ciklus két prekursor esetén tehát a következő lépésekből áll:

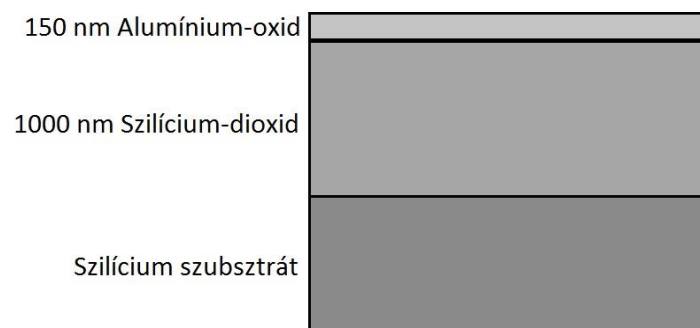
- prekursor 1 felületre juttatása
- a kötődést jellemző szaturáció lezárulta után  
a felesleg eltávolítása
- prekursor 2 felületre juttatása
- a kötődést jellemző szaturáció lezárulta után  
a felesleg eltávolítása

Majd a ciklus indul előlről. Egy adott prekursor felülethez való kötődése csak akkor indul el (és megy telítésbe), ha előtte a másik prekuzorral megtörtént ugyanez. Ez a felváltott felületi reakciók ciklikus alkalmazása, ami megkülönbözteti más kémiai gőzfázisú leválasztási technikáktól, ez teszi lehetővé a rétegvastagság növekedésének egyszerű és pontos szabályozhatóságát, a réteg uniformitását, és a

rétegnövesztés megismételhetőségét [17, 18]. Az egy ciklusban leválasztott réteg vastagsága Angström vagy még az alatti nagyságrendbe esik. A módszer további előnye, hogy a prekursorok reakcióterbe való juttatásának fluxusa, eloszlása nem kell állandó legyen, hisz megfelelő időt várva a folyamat szaturációs jellege megakadályozza, hogy egyes helyeken például gyorsabban növekedjen a rétegvastagság.

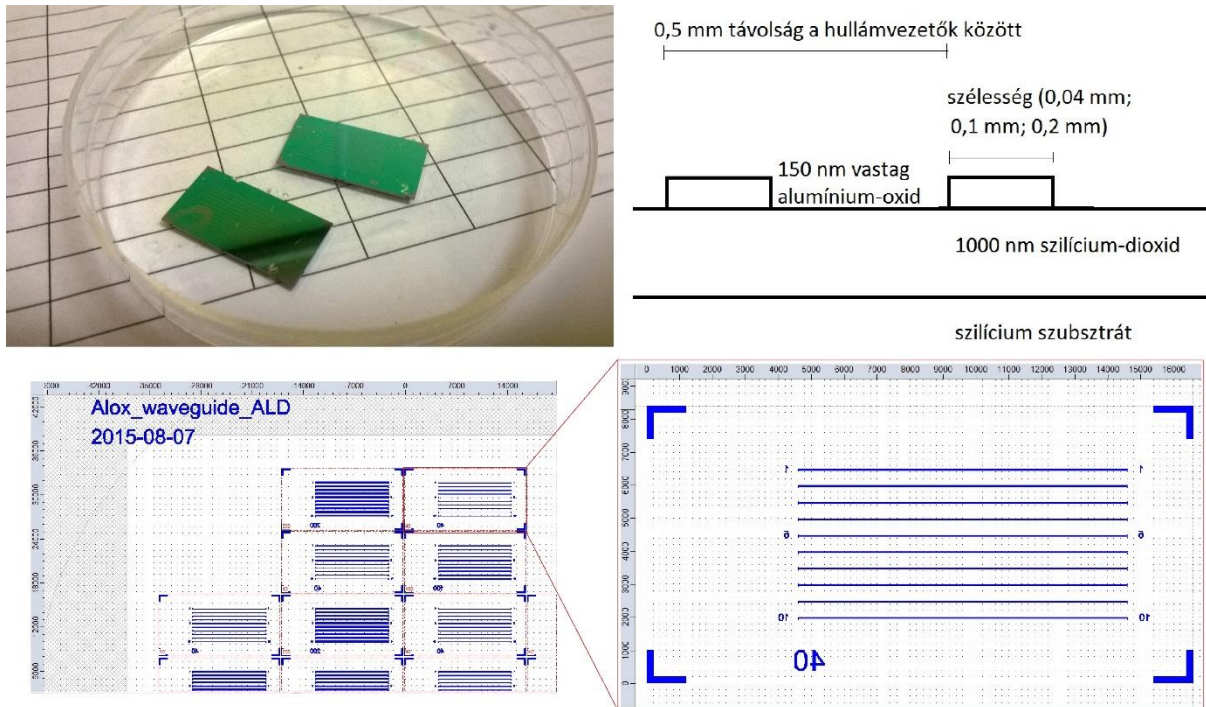
Az eljárást limitáló tényező az idő. Vastagabb rétegek leválasztásának jelentős lehet az időszükséglete. Tipikus növekedési ráta a néhány száz nanométer óránként. A mintáimon a hullámvezető kialakításához ALD technikával leválasztott alumínium-oxid filmréteg vastagsága pont ebbe a néhány száz nanométeres tartományba esik, így az idő nem volt limitáló tényező számunkra ebből az aspektusból.

Többféle minta állt rendelkezésemre a hullámvezetőre történő csatoló rácsok előállítását célzó technológiai folyamat kidolgozására. Kísérleti jelleggel 3 inch átmérőjű szeleten lett kialakítva az alábbi struktúra: egykristályos szilícium hordozóra 1  $\mu\text{m}$  vastag szilícium-dioxid lett termikus úton leválasztva, majd ennek felületére történt 150 nm vastag  $\text{Al}_2\text{O}_3$  réteg leválasztása ALD-vel (I. típusú minta). Ez a szelet lett felfűrészelve kis 1cm x 1cm-es négyzet alakú darabokra.



5. ábra A kezdeti minták keresztmetszeti vázlata (nem méretarányos)

Az optika mérésekhez készülő minták (II. típusú minta) megvalósíthatóságának tesztelése esetén ugyancsak 3 inches szeleten történt a hullámvezetők atomi rétegleválasztása. Fotolitográfia és különböző marási eljárások segítségével azonban itt kis, 16,6 mm x 8,4 mm-es téglalap alakú mintákon csak vékony, 1 cm hosszú, különböző vastagságú hullámvezető csíkok lettek létrehozva, melyek végeire kellett a tervezett csatoló rácsok geometriáját transferálni. Ezen minták keresztmetszeti, és felületi képei láthatók az alábbi ábrákon szereplő fotomaszk terveken, sematikus ábrával és fotóval szemlélítve. Az alapstruktúra itt is hasonló volt, a szilícium-hordozón lévő 1 mikron vastag oxidrétegre történt a 150 nm vastag hullámvezető réteg leválasztása.



6. ábra Minták optikai méréshez (Bal fent) A téglalap alakú minták hullámvezető csíkokkal ellátva, fénykép (Jobb fent) a technológiai folyamat teszteléséhez használt minták keresztmetszeti vázlatja, nem méretarányos, (Bal lent) ezen minták maszkmintázatának részlete a 3 inches szeletről, ahol a különböző hullámvezető szélességű minták láthatóak, (Jobb lent) a 40  $\mu\text{m}$  vastag hullámvezetőket tartalmazó minta ábrája. A fotolitográfiai maszkdizájn (megrajzolt maszkábra) tükrözött képe transzferálódik a hullámvezető rétegbe.

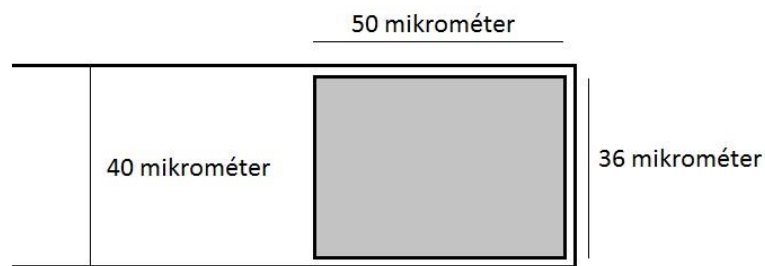
A teljes technológiai folyamat kidolgozása után a ténylegesen optikai mérésre szánt minták (III. típusú minta) esetén figyelembe vettük a marási lépések alámarási jellegét is. A későbbiekben fogjuk látni, hogy esetünkben emiatt szükséges volt alkalmazni még egy maszkolást, hogy a rácsmintázat marásakor tényleg csak a csatolórács helyén történjen marás, ne pedig a minta teljes felületén. Ez vezetett a következő, optikai mérésekhez szánt minták előállításához.

- Kémiai felülettisztítás után 1  $\mu\text{m}$  termikus szilícium-dioxid növesztése a szilícium hordozóra
- ALD technikával 150 illetve 300 nm (mintától függ) vastag  $\text{Al}_2\text{O}_3$  leválasztása
- Fotolitográfia segítségével maszk mintázatot készíteni a fotorezisztből a hullámvezetők mentén
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  marása hidrogén-fluoriddal, illetve a fotoreziszt eltávolítása. Ezután csak a fent látható csíkok mentén marad meg az alumínium-oxid réteg a mintákon
- Alacsony nyomású kémiai gőzfázisú leválasztással (LPCVD) újabb, 300-400 nm vastag oxid réteg felvitele a felületre, majd 100 nm alumínium leválasztása elektronsugaras gőzöléssel (ez lesz a maszkréteg a későbbi marási folyamathoz)



- Újabb fotolitográfiai lépés, ahol a fotorezisztben ablakokat nyitunk a hullámvezetők végeivel megegyező területen, hogy a rácsmintázatot itt később kialakíthassuk
- Nedves marással az alumíniumot ezen ablakok helyén lemarjuk, majd a lakkot acetonnal eltávolítjuk
- végül SILOX maróval a 300 nm szilícium-dioxid réteget is szelektíven lemarjuk erről a területről

A 3 inches szelet felfűrészelése után így jutottam olyan mintákhoz, melyeken az előző ábrákon látható struktúrával megegyező módon találhatóak a különböző alumínium-oxid hullámvezető csíkok (150 nm, illetve 300 nm vastagságban), illetve a felület legalább 300 nm szilícium-oxiddal és 100 nm alumíniummal van borítva. A hullámvezető csíkok végeinél kisebb ablakok vannak nyitva, ahol a hullámvezető anyaga a levegővel határos, így alkalmas a megmunkálásra. Ezek az ablakok hossza 50  $\mu\text{m}$ , szélessége pedig mintafüggő, mindig a hullámvezető csík szélességénél 4  $\mu\text{m}$ -rel kevesebb, hogy a széleken legyen egy 2-2  $\mu\text{m}$ -es rész, ami biztosítja, hogy csak a hullámvezetőn történjen megmunkálás, az ábrák ne lógjanak le róla.



7.ábra A hullámvezető végén található ablak méretei 40  $\mu\text{m}$ -es mintán

A minták törésmutatója ellipszométerrel lett lemérve, a hullámvezető alumínium-oxid réteg esetében 1,69-nek adódott 310 nm esetén, míg az ezt borító szilícium oxid (vastagsága 369 nm  $\pm$  0,06 nm) törésmutatója ugyanezen hullámhosszon 1,49 volt. A hullámvezetés feltétele tehát megvalósul.

Ezeket a lépéseket a laborban dolgozó kollégák, illetve témavezetőm végezték, és a fenti folyamat eredményeként kapott minták álltak rendelkezésemre a további technológiai lépésekre. Az eddig használt eljárásokat ezért itt nem részletezem jobban, azonban a következőkben bemutatom röviden azon technikákat, melyeket már én használtam a további felületi megmunkáláshoz.

### 3.2. Elektronsugaras litográfia és pásztázó elektronmikroszkópia

Az elektronsugaras litográfia a pásztázó elektronmikroszkópiából fejlődött ki, itt is található egy úgynevezett stage (tárgyasztal), amin a minta van rögzítve, valamint egy elektronforrás, és a kilépő

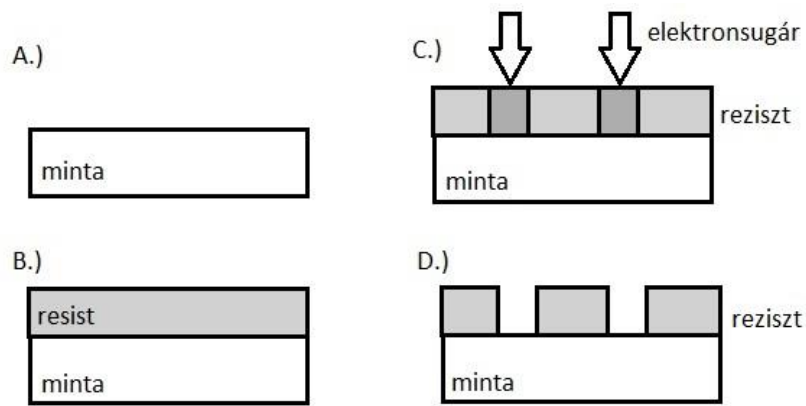
elektronokat gyorsító, illetve nyalábformáló egységek, melyek lehetővé teszik az elektronnyaláb pontos fókuszálását a mintára tetszőleges gyorsító feszültség alkalmazása mellett.

A mikroszkópia esetén a képalkotás úgy történik, hogy a fókuszált elektronsugár és a minta felületének kölcsönhatása során keletkező részecskéket vagy sugárzást detektáljuk, és a nyaláb mozgásával végigszkenneljük a mintát a teljes kép megalkotásához. Tipikusan a visszaszórt elektronok, illetve a sugár és az anyag kölcsönhatása során keletkező szekunder (Auger-) elektronok detektálásával alkotunk képet, az általunk használt berendezés esetében is elérhető volt a két üzemmód a szoftveres kezelőfelületen. Emellett lehetne még akár karakterisztikus röntgenfotonok detektálásával is képet alkotni [22-24].

A litográfia elnevezés onnan ered, hogy a fotolitográfiához hasonlóan a mintát olyan anyaggal vonjuk be, ami (jelen esetben az elektron-) nyaláb hatására szerkezetváltozáson megy át, így a felület egyes részein leoldható lesz, másutt nem. Az elektronsugaras litográfia esetében a leggyakrabban alkalmazott ilyen anyag a PMMA (polimetil metakrilát – polymethyl methacrylate). Azokon a helyeken, ahol az elektronsugár éri, a hosszú polimer láncok felszakadnak, és itt az anyag leoldhatóvá válik. A fotós technikából véve a kifejezést, ezt a folyamatot (az exponált rész leoldását) hívjuk előhívásnak (development). Az előhívóoldat (developer) gyanánt 1:3 arányú MIBK-IPA keveréket használtunk (metil-isobutil-ketone illetve izopropil alkohol), az előhívás után pedig az úgynevezett stopperbe mártottuk a mintát (tisztá IPA), ami megállítja az előhívást, majd nitrogénpisztollyal és hőkezeléssel szárítottuk meg a mintát.

A fotolitográfiához képest nagy előnye, hogy nem kell maszkot gyártani, hanem közvetlenül tudunk adott területet exponálni a sugárnyalábbal (direkt írás), valamint nagyobb térbeli felbontás is elérhető vele. Ehhez azonban az kell, hogy a sugárnyaláb jól irányítható legyen, a fókuszt pontosan meghatározott legyen a tárgyasztalhoz képest, illetve a tárgyasztalt magát is nagyon pontosan és jó felbontással tudjuk mozgatni. Ezek a tulajdonságok szükségesek ahhoz, hogy litográfiára is alkalmas legyen a berendezés, és így ezek a tényezők is azok, amik magasabb árúhoz vezetnek.

Tipikus esetben tehát, miután a rezisztet a mintára terítettük, a mikroszkóp üzemmód segítségével beállítjuk a sugárnyaláb tulajdonságait (fókuszt, asztigmatizmust) és a mintán kialakítunk egy koordináta rendszert, amelyet összeillesztünk a litografáláshoz megszerkesztett ábránkkal, majd ezen mintázat mentén adott energiájú és dózisu (sűrűség jellegű mennyiség, töltés/felület vagy töltés/hossz) nyalábbal a rezisztet exponáljuk.



8.ábra Elektronsugaras litográfia lépései

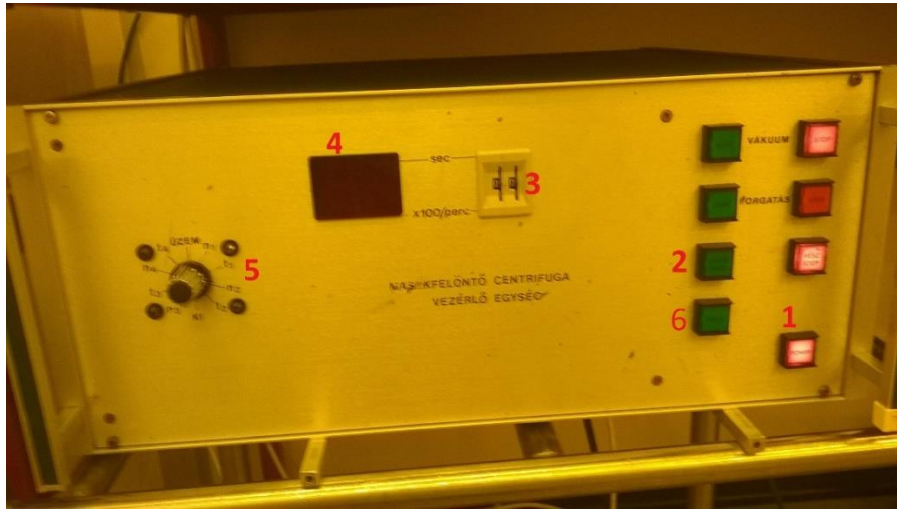
A mintán ezután további műveleteket végezhetünk, mint például a később bemutatott lift-off technika, illetve újból meg is nézhetjük a berendezéssel pásztázó elektronmikroszkóp módban, hogy jellemezni tudjuk például az exponálás sikerességét. Ez azonban éles mintán nem végezhető el, hiszen a litográf és a mikroszkóp üzemmod alapelve ugyanúgy az elektronsugárral történő szkennelés, így a mikroszkóppal vizsgált területeken a reziszt exponálódik, ami (még újbóli előhívás nélkül is) további műveletek eredményes elvégzését akadályozza meg. A kezdeti mintáinkon végzett litográfiai lépés eredményességét mi is ellenőriztük pásztázó elektronmikroszkóppal.

A litografálás előkészítéseként a mintákra minden alkalommal a spin-on coating technikával pörgettük fel a rezisztréteget. Ez a berendezés egy, a mintát a tárgyasztalhoz rögzítő vákuumszivattyúból, és egy pörgetést végző egységből, valamint az ezt vezérlő elektronikából áll.



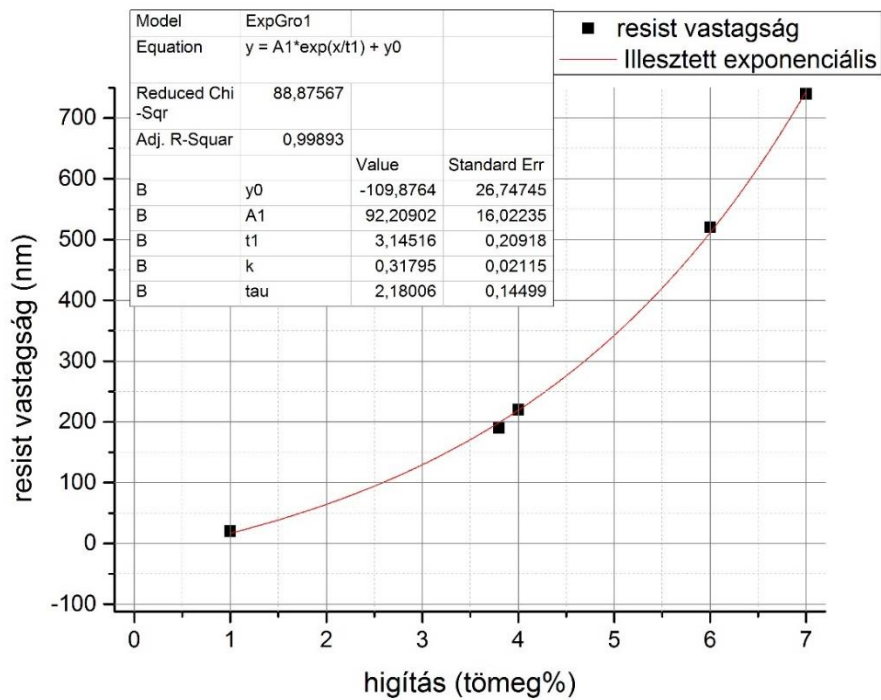
9.ábra Spin-on coating berendezés (1.Spin-on coater -közepén a forgó tengellyel, és a mintarögzítővel-, 2.Vezérlő egység 3.Vákuum kapcsoló)

A vezérlő segítségével tudjuk kiválasztani, hogy mennyi ideig és milyen fordulaton szeretnénk forgatni a mintát. Így előzetes Hot Platen végzett hőkezelés után a mintát a coater tárgyasztalára helyezve, és a rezisztet a mintára cseppentve, majd a megfelelő beállítások mellett megpörgetve egy egységes, és adott vastagságú rétegben kerül el a reziszt a mintán.



10.ábra Vezérlő a spin-on coater-hez (1.Bekapcsoló power gomb, 2.Autostart gomb, ami a forgatást a vákuum bekapcsolásával együtt indítja el, 3.Két digitális tekerős állító, 4.Kijelző, 5.Üzem állító -1-,2-,3-,4 program, kikapcsolt és üzemkész-, 6.Input gomb a beállított érték bevitele paraméternek)

Rezisztnek két fajta PMMA alapú terméket használtunk, az egyik 40 másodperces, 4000 1/perc-os fordulatszám mellett volt alkalmas 80 nm vastag réteg felpörgetésére, és ez érzékenyebb volt az előhívó folyadékra (gyorsabban zajlott az előhívás).



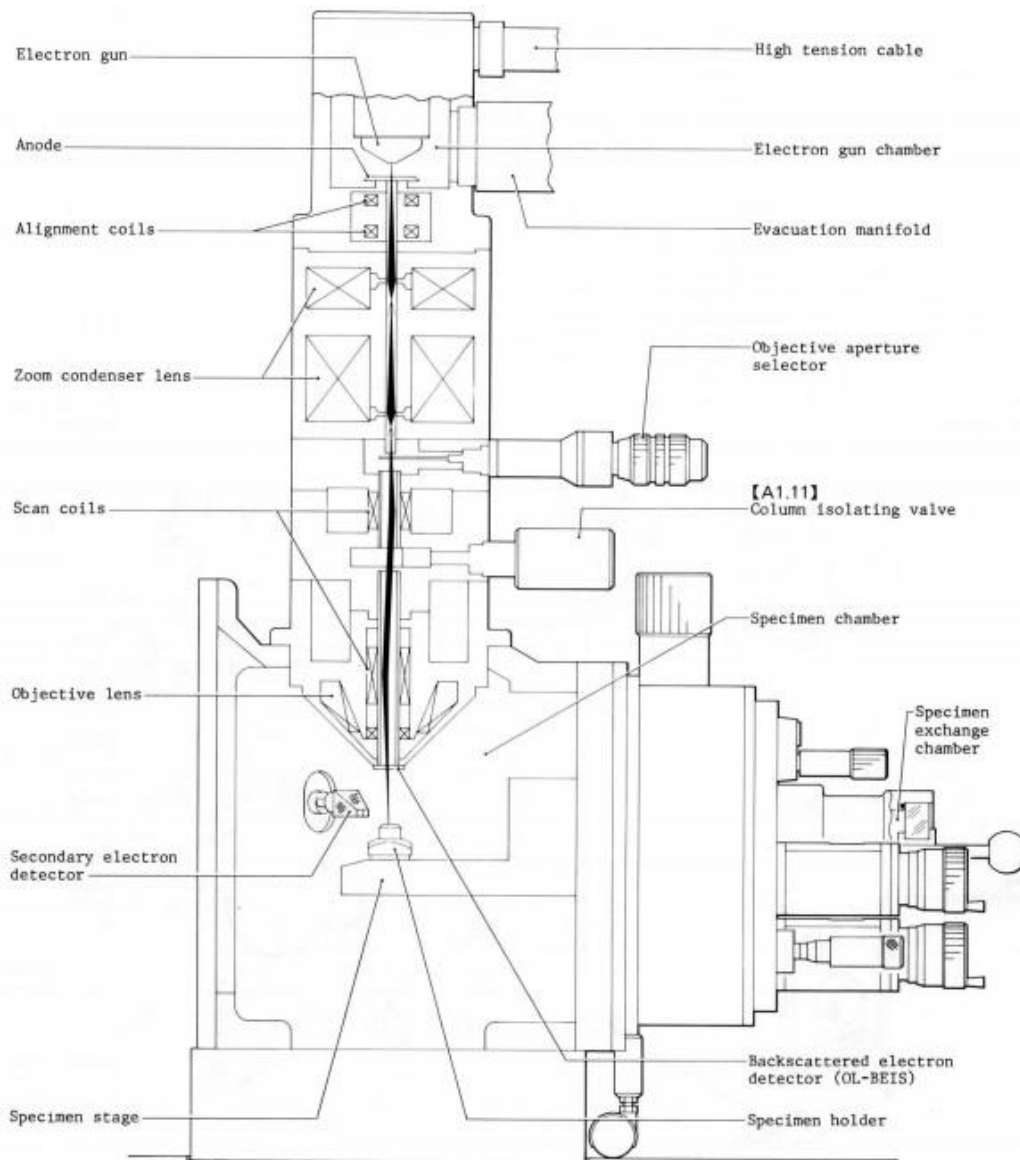
11.ábra Reziszt hígításának hatása a felpörgetett rétegvastagságra

A másik esetében szintén 40 másodperces 4000 1/perc-es fordulatszám esetén különböző hígítás mellett ismertük a kialakuló reziszt vastagságot. Ezekre az adatokra függvényt illesztettünk, hogy interpolációval kívánt vastagsághoz szükséges hígítási arányt tudjunk elérni (11. ábra). Ez a reziszt lassabban hívódott elő, jobban ellenállt az előhívó oldatnak. Minden réteg felpörgetése után 5 perces 170 °C-os hőkezeléssel stabilizáltuk a fotolakkot.



12.ábra Elektronsugaras litográf

A litográfiai lépéseket Dr. Lukács István segítségével végeztem a közelmúltban üzembe helyezett RAITH150 elektronsugaras litográfiai berendezéssel. Az általunk használt beállítások jobb megértése érdekében következik az alábbi ábrán egy pásztázó elektronmikroszkóp általános felépítése.



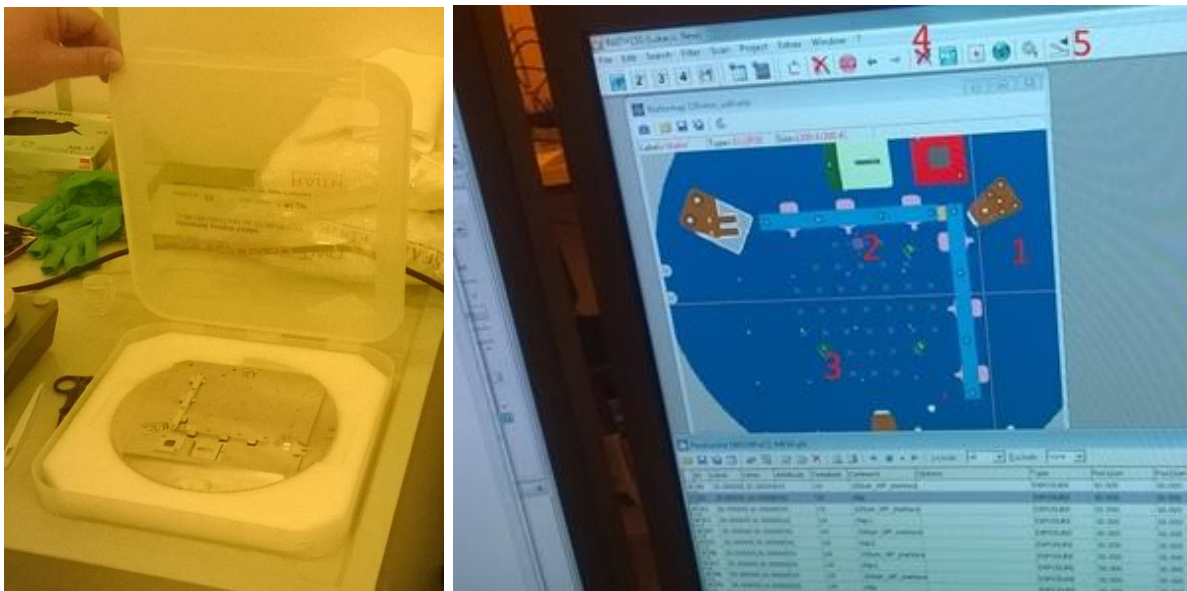
13. ábra SEM mikroszkóp felépítése [22]

A mikroszkóp korábban említett részein kívül (különböző módok detektorai, nyalábformázó és eltérítő tekercsek és elektromos lencsék, tárgyasztal) a további tárgyalás szempontjából fontos a gyorsító feszültség. Litografáláshoz használt tipikus értéke 20 kV. Az elektronsugár az reziszt anyagába lépve, illetve a hordozó rétegből visszafelé is szóródik. Ez azt eredményezi, hogy bár a felületen egy adott területet szkennelünk végig a nyalábbal, mélyebb régiókban ez kiszélesedett expozícióhoz vezethet. Minél nagyobb az energia, annál mélyebben van a kiszélesedés maximuma, és az annál nagyobb. Befolyásoló lehet még a rezisztvastagság, amikor ez a kiszélesedés mélységével azonos nagyságrendbe esik.

Egy másik fontos elem az apertúra (13. ábrán objective aperture selector), ami a sugárnyaláb csak egy adott sugáron belül eső részét engedi tovább. Kisebb apertúra jobban fókuszálható nyalábhoz vezet,

ami nagy térbeli felbontást igénylő litografálás esetén előnyös, azonban ezzel egy időben a töltésáram csökken. Ez a szkennelési időt növeli meg. Ezen két szempont alapján érdemes kiválasztani az optimális értéket. Mi az esetek többségében 15  $\mu\text{m}$ -es apertúrával ( $\sim 0,09$  nA töltésáram, amit a tárgyasztalon található Faraday-lyukban tudunk automatikusan mérni a berendezés segítségével) dolgoztunk, ami a szükséges  $\sim 10$  nm-es felbontáshoz megfelelő volt.

A fenti két beállítást végeztük el először a minta betöltése és a szerviz-paraméterek ellenőrzése után. A mintát érdemes gyémánt karcolóval előzetesen megkarcolni semleges területen, hogy legyen apró egyenetlenség, amin a sugárminőség beállítható. A mikroszkóp paramétereinek többsége a kezelőfelületen párosával állítható. Ilyen párok például a nagyítás-fókusz, függőleges-vízszintes asztigmatizmus.



14.ábra Az EBL mintatartó (bal) és a szoftveren megjelenített virtuális képe (jobb 1., - 2. A sugár pozíciója a virtuális képen 3. Elhelyezett pont-jelölő zászlócska 4. Sugárnyaláb be és kikapcsoló gomb 5. Load in és out gomb)

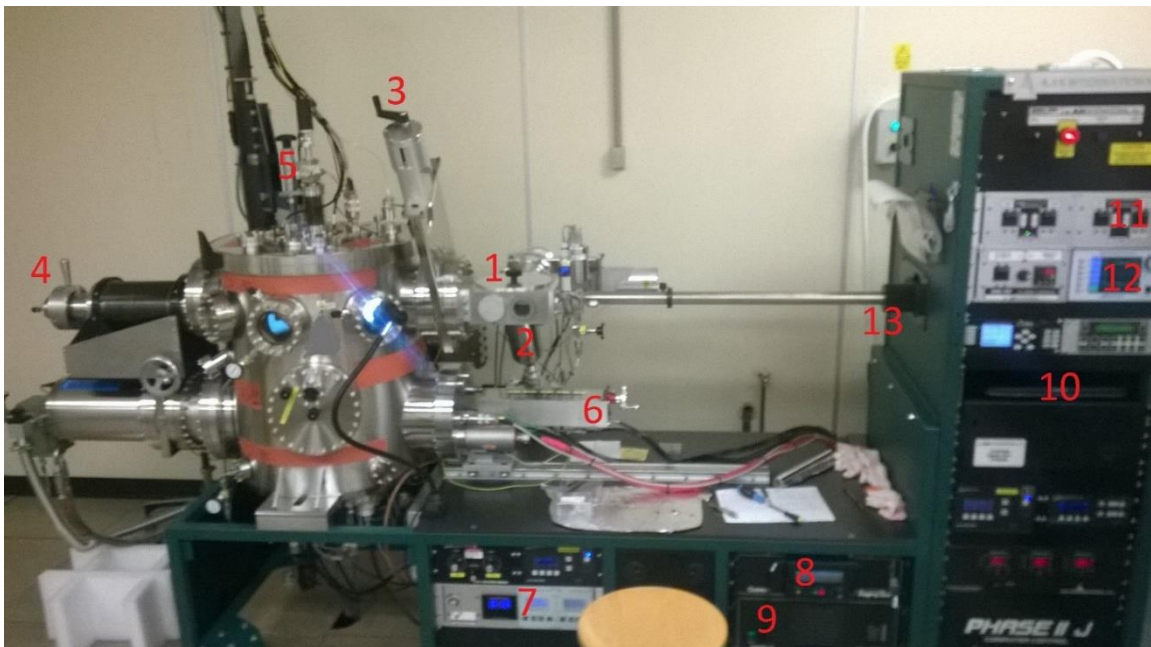
Sík minták esetén globális, és lokális koordinárendszer beállítása a következő lépés. A lokális esetében érdemes 3 pontos, fókuszált lokális koordinárendszert beállítani, ahol 3 ponton fókuszálunk, majd a virtuális mintánkon a zászlókkal kijelölve az adott pontot, és beolvasva a szoftver rendelkezésére áll a lokális koordináta rendszerben 3 pont, amiben a fókusz be lett állítva, innen interpolálva minden síkpontra ki tudja számolni a helyes fókuszt. Ezek után a szoftverben megszerkesztjük, vagy betöltjük a dizájn ábrát, és véglegesítjük. Litografálandó rétegeket (layer) kiválasztjuk, és a hozzájuk tartozó írási terület (write field) méretét és helyzetét beállítjuk. Az írási terület a sugáreltérítéssel litografált területegység, adott írási területek együttese adja ki a teljes litografált ábrát, az illesztéseknél lehet némi eltérés, ezért érdemes úgy megválasztani, hogy az írási



terület határvonalai nem messenek a designon megrajzolt ábraelemet, másrészt ezért olyan fontos a tárgyasztal pontos mozgathatósága. Az egyes mintaelemekhez tartozó dózist beállítjuk relatív egységben. Ha az egész minta ugyanazzal a dózissal van litografálva, akkor ez mindenhol 1. Tipikus dózisérték területre  $180\text{-}200 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  illetve vonal esetén  $400\text{-}1000 \text{ pC}/\text{cm}$ . Pozíciólistában tudjuk meghatározni a szkennelési műveleteket (position list). Itt kiválaszthatjuk, hogy a dizájn mely rétegeit (layereket) szeretnénk litografálni, innen indítható később a litografálás (scan).

A dózis értéke az alkalmazott rezisztvastagságtól függ. Vastagabb reziszt esetében például nagyobb dózissal tudjuk a teljes réteget adott területen exponálni, de a nagyobb dózis hosszabb szkennelési időt jelent. A hosszabb idő alatt több lesz a szórt elektronok száma, ami az exponált terület kiszélesedésének mértékét is növelheti.

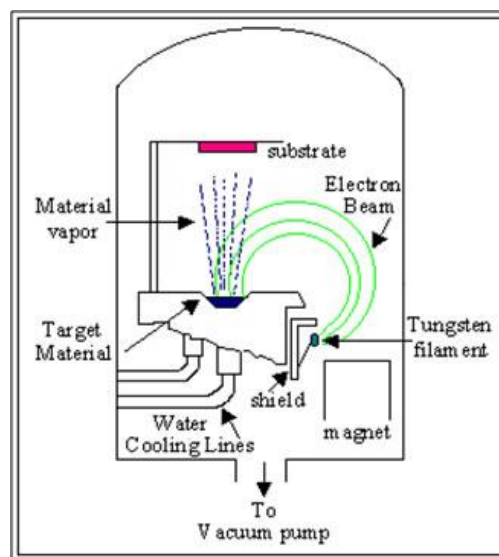
### 3.3. Vékonyréteg leválasztás



15. ábra AJA vékonyréteg leválasztó (1. Load lock kamra 2. Ion-ágyú 3. Load lock és főkamra közötti zsilip nyitó/záró kar (kamrazsilip) 4. Cryozsilip nyitó/záró kar (a cryo pumpa állítja elő a központi kamra nagy vákuumát) 5. Főkamrában a mintatartó magasságának állítója 6. Elemszelektor, egy tekerő kar segítségével választható ki a leválasztani kívánt elem 7. Főkamra hőmérséklet 8. Kézi vezérlő panel 9. Tápegység kapcsoló 10. Laptop a mérőszoftverekhez és naplófájlnak 11. Loadlock kamra vákuumjának be és kikapcsolója (load lock off/on) 12. Fémezés programjának menügombjai és kijelzője 13. Mintatartó mozgató mágnes, és a hozzá tartozó pálya)



A laborban rendelkezésünkre álló AJA International Inc. cég vékonyréteg leválasztó berendezésével többféle módon tudunk fémréteget a mintánkra leválasztani. Az általam használt üzemmód neve e-beam evaporation (fizikai rétegleválasztás), amikor elektronsugárral párologtatunk [27]. A mintát a mintatartóval együtt lefordítva kell a berendezésbe helyezni. Mivel az eljárás nagyvákuumot igényel ( $\sim 10^{-7}$  Torr), ezért egy külön (load lock) kamra áll rendelkezésre a minta betöltéséhez. Ennek a kisebb kamrának is van egy vákuumszivattyúja, illetve a főkamrának egy nagyobb teljesítményű cryo-pumpája. Először tehát a load lock kamrába helyezve a mintát, és ott mintegy  $10^{-5}$  Torr vákuum elérése után a főkamrától elválasztó zsilip nyitása után a minta a rétegleválasztáshoz betölthető. Elemszelektorral tudjuk a majdani elektronsugár útjába pozícionálni a leválasztani kívánt anyagot (esetünkben alumínium).



16.ábra Elektronsugaras párologtatás [31]

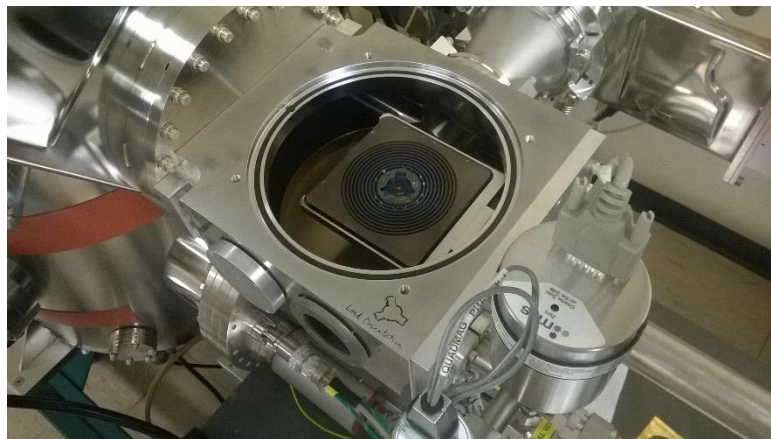
A minta betöltése után tudunk programot választani, illetve különféle leválasztandó rétegeket definiálni. Én mindig egy réteggel dolgoztam, ezért csak a rétegvastagságot, és a leválasztási sebességet állítottam be. Utóbbi minden esetben 1 Angström/másodperc volt. Amíg a berendezés nem éri el az adott rétegnövekedési sebesség, addig egy úgynevezett árnyékolóval (shutter) a szoftver nem engedi a leválasztást megindulni. Hasonlóan a kívánt rétegvastagság elérése esetén először az árnyékolók csukódnak a forrás és a minta közé, majd a teljesítményt fokozatosan csökkenti nullára a berendezés. Ez garantálja, hogy a rétegnövekedés sebessége a teljes leválasztási folyamat alatt közel állandó maradjon.

Ugyanakkor a leválasztott réteg vastagsága a labor munkatársainak tapasztalata alapján nem mindig pontos, ez a rétegvastagság mérésének elvével magyarázható, ami a leválasztott réteg tömegnövekedésén alapul, s mivel az alumínium sűrűsége fémként relatíve alacsony, ez nagyobb

mérési bizonytalanságot okoz a leválasztott réteg vastagságának meghatározásában. Számomra a rétegvastagság pontossága nem volt annyira kritikus a későbbiekben bemutatott okok miatt.

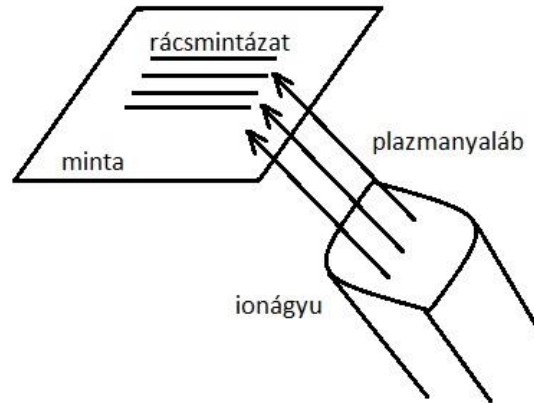
### 3.4. Száraz marás

Az AJA leválasztó berendezését lehet ionizált argon illetve oxigéngázzal (plazmával) történő marásra is használni (Argon plasma etching). Ekkor a vékonyréteg leválasztó, központi vákuumkamrától zsilippel elzárt load lock kamrába helyezük a mintatartót szokásos módon lapjával lefele nézve. Az ionágyú ugyanis a kamra alsó felén található, így az marásnál a plazma a minta alsó felületével szemben helyezkedik el. Az ágyú nem függőleges, hanem ferde állású, ezért a marás nem izotróp abból a szempontból, hogy az ionnyaláb ferde irányban éri a felületet. A minta pozícionálása ebből kifolyólag körültekintést igényel. Egyes mélyebb területek árnyéktérbe kerülhetnek, illetve a lemart réteg visszaporlódhat a minta felületére.



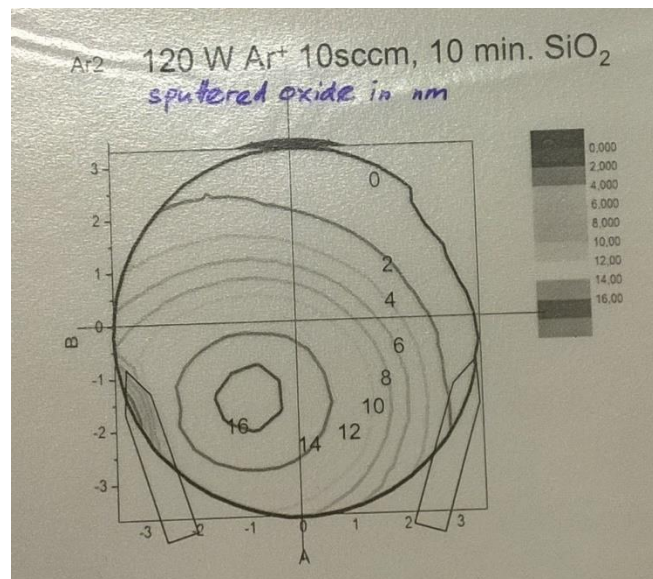
*17. ábra Load lock kamra a fejjel lefelé behelyezett mintatartóval*

Esetemben hosszanti barázdákat kellett marjak a rácsmintázat előállításához, ezért a fenti okok miatt mindig úgy rögzítettem a mintát, hogy a barázdák (nem a hullámvezető csíkok, hanem a végeiken létrehozott struktúra) hosszanti iránya egybe essen a plazmanyaláb horizontális síkra vett vetületével. (18. ábra)



18.ábra Plazmamarás elrendezési vázlata

Másrészt a mart felületen a nyalábintenzitás és ezáltal a marási sebesség nem homogén. A 18. ábrán látható, SiO<sub>2</sub>-re vonatkozó adatokat figyelembe véve mindig a legnagyobb marási sebességű területre rögzítettem a mintát, hisz az ugyanott helyezkedik el más anyagokra is. Ekkor a marási sebesség abszolút értéke nem volt ismert, ezért erre vonatkozóan végeztem méréseket. Minden esetben argon gázt használtam a maráshoz.

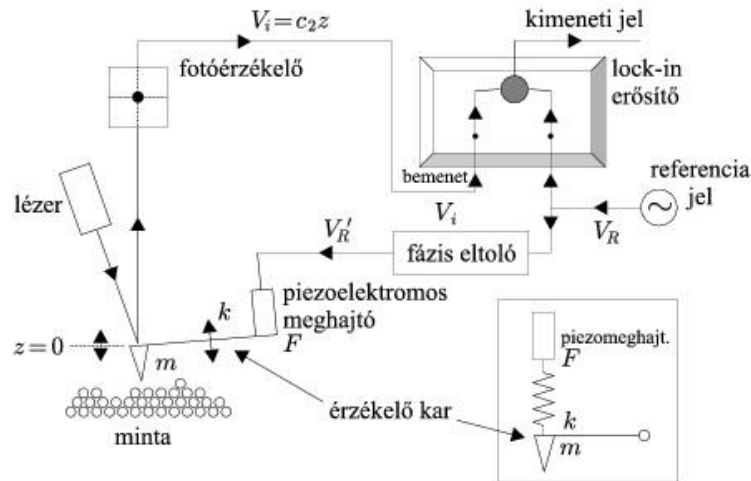


19.ábra A marás ekvi-sebesség térképe szilícium-dioxidra

A kezelőfelületen be lehet állítani az ionágyú teljesítményét, valamint a kívánt részecske-áramot (plasma flow), illetve, hogy a teljesítményt milyen felfutási idővel akarjuk az ágyún állítani. A load lock kamra nyomásának növekedése jelezte minden esetben, hogy az argongázzal való ellátás megfelelő, ezután kapcsoltuk be az ágyút. A munkám során mindig 120 W teljesítményt (10 másodperces felfutási idővel), és 10 sccm részecske áramot használtam, egyedül a marási időt változtattam.

### 3.5. Atomi erőmikroszkópia

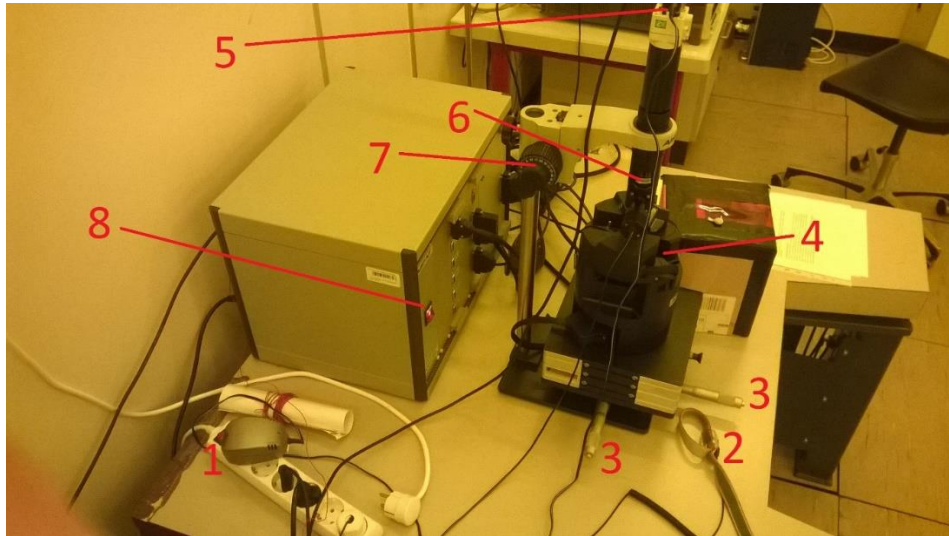
A mintákon létrehozott felületi struktúrák vizsgálatára többek között atomi erőmikroszkópiát használtam. A pásztázó alagútmikroszkóppal nem vezető minták felületéről nem tudunk közel atomi mérettartományba eső információval szolgálni [19]. Ezt az igényt is kielégítendő fejlesztették ki az atomi erőmikroszkópiát. Itt nem a pásztázó tű és felület közötti alagútáram elvén alapul a mérési módszer, hanem az atomi skálán jelentkező erők mérésén, azok okozta hatásokon [19, 20]. Az eljárás részben hasonlít a mechanikus profilométerhez is, azonban jobb felbontást tesz lehetővé.



20. ábra AFM mikroszkóp felépítése [32]

A berendezés egy kantileveren található tűvel pásztázza a felületet. Kontakt módban a tű a felülethez olyan közel megy, hogy már a kis hatótávolságú atomi erők hatására görbül meg a kantilever, amit precíz lézeroptikával ki tudunk mérni. Itt is használhatunk konstans erő, vagy adott magasság megtartása melletti szkennelést. Ez a mód a tű számára jóval komolyabb igénybevételt jelent, hiszen a kontakt révén könnyebben eltompulhat, eltörhet. Ezért ezek a tűk erősebb kialakításúak. A minta szempontjából is lehet problémás a kontakt mód. Biológiai minták esetében ugyanis a felületeket felsértheti a kontakt mentén a tű, főleg ha a mérési mód miatt keményebb tűt használunk.

Egy másik üzemmód az úgy nevezett tapping mód. Ez a módszer azt használja ki, hogy a kantilevernek a rajta elhelyezett tűvel együtt van egy adott rezgési rezonancia frekvenciája. E közelében rezgésben tartva a tűt, érzékenyen reagál kis hatásokra is, akár kismértékű eltolódása is a frekvenciának az amplitúdóban jelentős változást okoz. A felület közelében az atomi erők hatására pontosan ilyen kis frekvencia-eltolódás következik be a tű rezgésében. Itt is tarthatjuk egyrészt állandó szinten a frekvenciát (a tű mozgásával korrigáljuk a frekvencia-eltolódást, állandóan visszajuttatva az érzékeny tartományba), illetve adott tűmagasság mellett mérhetjük a frekvencia eltolódás mértékét. [19]



21. ábra AFM mikroszkóp (1. Elosztó 2. Földelő karkötő (tűcserénél kötelező a csúcshatás miatti kislülés elkerülése érdekében) 3. Mikroszkóp tárgyasztal (stage) mozgatók x-y síkban (durva) 4. tárgyasztal 5. Kamera kábel és csatlakozóhely 6. Optikai mikroszkóp fókuszállító (finom) 7. Durva tárgy távolság állító az optikai mikroszkóphoz 8. AIST NT táp kapcsoló)

Az általam használt berendezés egy AIST-NT által gyártott SPM SmartSPM™-100 mikroszkóp volt. A tű látómezeje 5 mm x 5 mm. Ekkora területen lehetett mozgatni, miután a minta adott pozícióban a tárgyasztalon rögzítésre került. Az atomi mikroszkóp felett egy optikai mikroszkóp is el volt helyezve, melynek okulárja egy kamerába juttatta a fényt, ami számítógéphez volt kötve. Így a tű pozícióját a mintán bizonyos felbontási korlátok mellett követni lehetett.

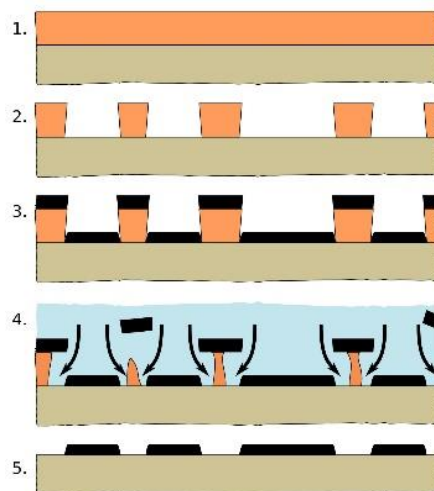
Az optikai mikroszkóp beállítása és a minta betöltése, majd a felület automatikus megközelítése után tudtam használni a berendezést a pásztázásra. A mintáim esetében a rácsok hosszanti barázdáltsága miatt figyelnem kellett a minták pozícionálására, ugyanis a tű, pásztázási irányra merőleges enyhe dőlése miatt a dőléssel egy tengelybe eső árkok alját még nagyobb oldalarány (aspekt ratio) esetén is le tudja tapogatni. A felületi struktúrák tipikus méretskálája a munkám során ~10 nm-től néhány 100 nm-ig terjedt, melyhez néhány 10 nm-es rezgési amplitúdót használtam.

További technikai szempontok a pásztázott felület (egészen pontosan a pásztázás irányába eső szélesség) nagyságának és a szkennelési sebességnek a viszonya, a tű kopásának megakadályozása ellen ugyanis nagyobb területet lassabban kellett szkenneljük. Közelítőleg ~ $\mu\text{m}$  szélességen 0.5 pásztázott sor másodperenként, ~10  $\mu\text{m}$  esetén 0.1 pásztázott sor másodperenként volt az általam alkalmazott érték. Mivel a rácsmintázat a tű dőlésével egyező módon a készült képen függőleges irányú volt, és rendre a keresztmetszeti rajzolat volt releváns a minták vizsgálata során, így a vízszintes felbontást állítottam nagyobbra (512 pixel), és a függőlegeset kisebbre, mivel ebben az irányban egyébként is végeztem néhány pixel vastagságban átlagolást a képek kiértékelésénél.

Ehhez a Gwyddion szoftvert használtam, mellyel automatikusan tudtam a felület ferdeségére, és a vízszintes irányú, műtermékként megjelenő csíkokra korrigálni, valamint a keresztmetszeti profilt kirajzoltatni. A szkennelt képen függőleges irányban a felbontás növelése a szkennelési idő növelését jelentette. Ezt azzal küszöböltem ki, hogy ebben az irányban nem vártam meg, míg a pásztázás véget ér.

### 3.6. Lift-off technika

Az eljárás lényege a mikrotechnikában, hogy egy adott anyagból létrehozzunk bizonyos felületi eloszlású réteget egy másik réteg segítségével [29]. Tipikus esetben valamilyen fotoreziszt jelenti az utóbbit, amibe fotolitográfiával, vagy elektronsugaras litográfiával a másik anyag kívánt felületi rajzolatának megfelelően mintázatot képezünk le. A minta előhívása után a megmaradt reziszt alkotja a maszkot a ténylegesen leválasztani kívánt anyag számára. Bár az egész felületre választjuk le az adott réteget, de az csak ott kerül a hordozó közvetlen felületére, ahonnan a rezisztet eltávolítottuk. Ezek után a maradék fotorezisztet a rajta a levő réteggel együtt leoldva a kívánt mintázatot kapjuk a hordozónkon. Az egyszerűsített folyamat lépései láthatóak a 22. ábrán.



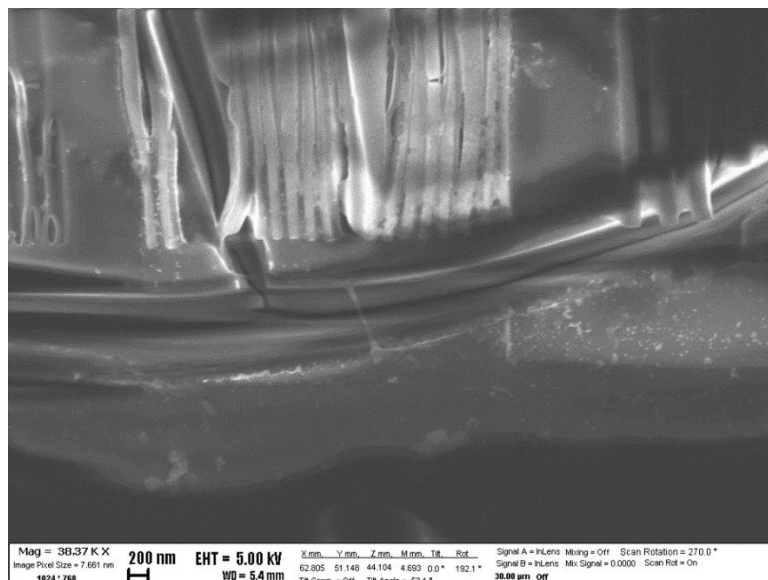
22.ábra Lift-off technika elve [29]

Nehézséget okoz, hogy bár leválasztási módszer függő, de tipikusan a lift-off technika során függőleges élek mentén is választódik le anyag. Ha a hordozón levő réteg, valamint a segédréteg tetejére leválasztott anyag összeköttetésbe kerül, akkor vagy nem tudjuk kivitelezni a lift-off-ot, mert a reziszt nem távolítható el, vagy olyan területen is marad anyag, ahol nem szeretnénk volna. A reziszt réteget acetonnal tudjuk lemosni a rezisztben levő alumíniummal együtt.



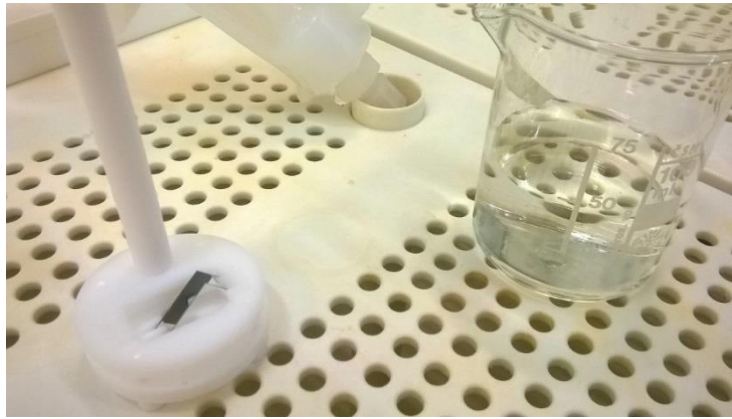
### 3.7. Nedves marás

Nedves marás alatt a mikro és nanotechnológiában olyan anyageltávolító módszert értünk, ahol a mintát vagy szeletet folyadék fázisú, maró komponensbe helyezük, s a felület anyaga kémiai úton távozik. Vékonyréteg esetén izotróp marási technika, emiatt a mart réteg határának oldala ferde, maszk alkalmazása esetén alámarás történhet [25]. Vékonyabb rétegek marásához leginkább szelektivitása miatt használt technika manapság is. Még munkám kezdetén próbáltuk ki, hogy hidrogén-fluoriddal (HF) történő nedves marással tudunk-e rácsmintázatot transzferálni EBL technikával litografált rezisztből a hullámvezetőbe. Bár a hígabb HF-ra a PMMA elméletileg nem érzékeny annyira [28], azonban a rácsmintázathoz használt kis periódus, és relatíve nagy oldalarány ezt nem tette lehetővé. A reziszt hártaként vált le helyenként, de legalábbis a rács hosszanti barázdáit a rezisztben maradó feszültség miatt is „összerántotta”, tönkretette a mintázatot.



23. ábra Sikertelen nedves marás (látható a felhasadt rezisztréteg és az összecúszott sávok)

A nedves marást így egy későbbi lépésben használtuk csak, száraz marás után visszamaradt alumínium eltávolítására. Híg foszforsavval (5%-os  $H_3PO_4$ ) ugyanis szobahőmérsékleten szelektíven tudjuk marni az alumíniumot anélkül, hogy a hullámvezető alumínium-oxid anyagára hasonló hatást gyakorolna. Bár a foszforsav magasabb hőmérsékleten marja az alumínium-oxidot is [26], azonban ez a hatás 22-24 fokos szobahőmérsékleten elmarad. A marási lépést így egyszerűen, mérőpohárban, teflon mintatartó segítségével történő áztatással vittük véghez.



24.ábra Nedves marás eszköztára (teflon mintatartó és a marófolyadék főzőpohárban)

## 4. Eredmények

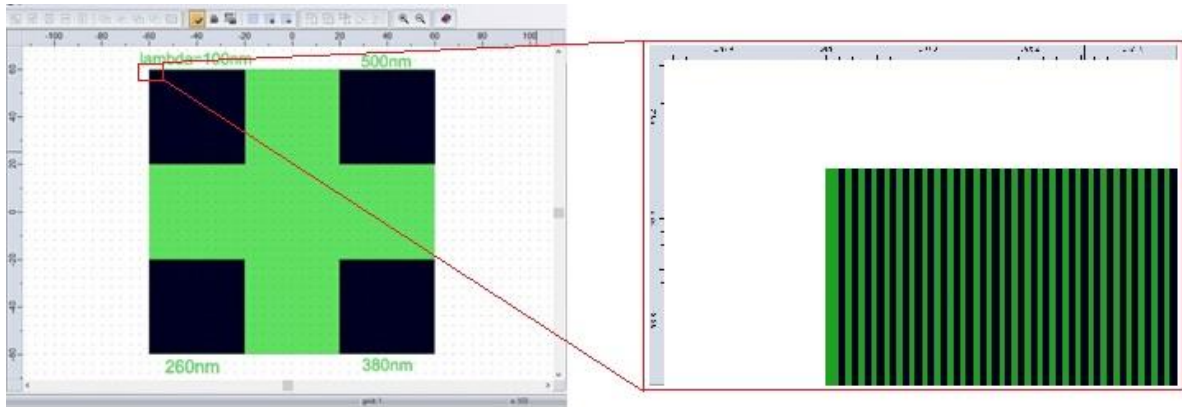
A folyamat talán legkritikusabb része az elektronsugaras litográfia. Éppen ezért ezt a lépést részletesebben vizsgáltam. Fontos szempontok a használt reziszt vastagság, litografálási dózis, tervezett, és megvalósult kitöltési arány a rácsmintázat esetén. A teljes folyamat végén a kitöltési tényező természetesen más, így nyomon követtem, hogy hogyan változik bizonyos lépések után. A Rácsmintázat barázdáinak mélysége nem kritikus, hogy mégis kontrollálható legyen, erre vonatkozóan is végeztem vizsgálatokat. Ezek mellett általánosságban véve fontos, hogy adott paraméterek mellett a minta megvalósítható, reprodukálható legyen megfelelő felületi minőségben. Az alábbiakban összefoglalom, hogy milyen jellegű vizsgálatokat végeztem, ezekhez milyen mintaszámmal, és milyen paraméterek felhasználásával dolgoztam. Tipikusan egy mintán több paraméterértéket is vizsgáltam az egyes kísérletekben.

- Rácsmintázat megvalósíthatósága különböző rezisztvastagsággal (3 mintával, 3\*4 paraméterérték)
- Dózis és kitöltési arány vizsgálata (3 minta, 3\*10\*10 paraméterérték)
- Alumínium-oxid marási sebesség (6 minta)
- Kitöltési tényezőre vonatkozó további vizsgálat az EBL technika utáni lépésekben (2 minta, 2\*10 paraméterérték)
- Teljes technológiai folyamat megvalósítása (2 minta)



#### 4.1. Reziszt vizsgálata

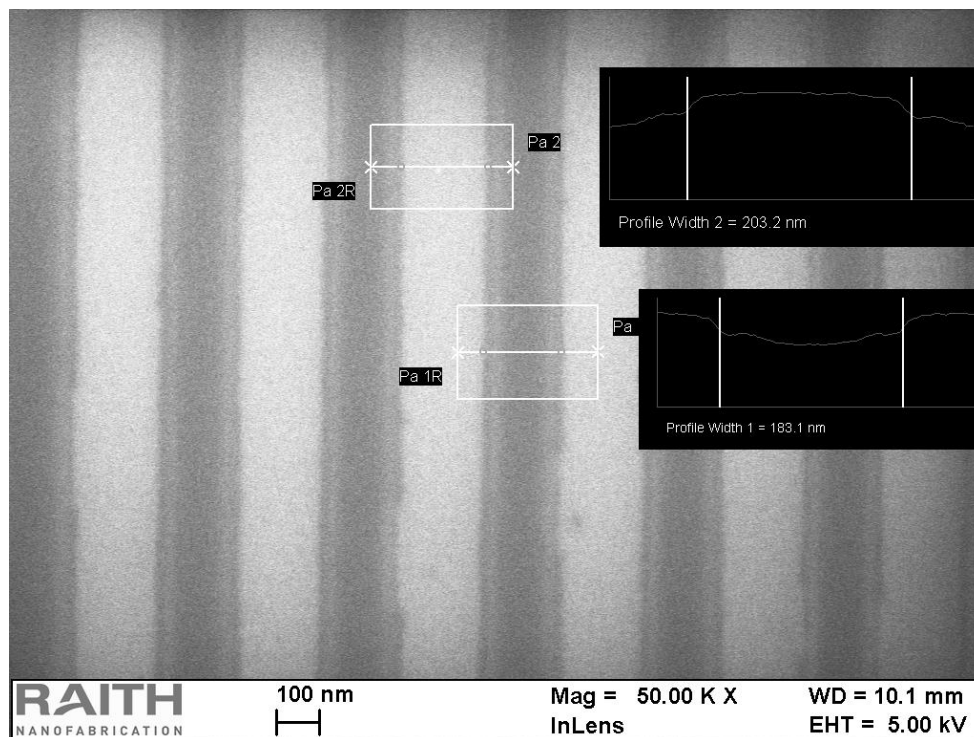
A kísérlethez a minták azok az 1 cm \* 1 cm befoglaló méretű kis szilícium lapkák voltak, melyek esetében a hordozón az 1  $\mu\text{m}$  szilícium-oxidon 150 nm alumínium-oxid réteg volt (I. típusú).



25.ábra A reziszt teszteléséhez használt litográfiai ábra

A litografálandó mintázatot a CleWin4 szoftverrel rajzoltam meg. Az ábra 4 db  $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$  területű négyzet alakú mintázatokból állt, melyek négyzet alakzatban voltak elhelyezve, ugyancsak  $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$  méretű üresen hagyott területekkel elválasztva. A 4 kis négyzet be volt vonalkázva függőleges irányban, ahol a rácsozás periódusa ( $\lambda$ ) rendre 100 nm, 260 nm, 380 nm és 500 nm voltak, 50%-os kitöltéssel. A vonalak és a közöttük levő üresen hagyott terület vastagsága is tehát a periódushossz fele volt.

Az ábrákat 3 minta közepébe litografáltuk. Ezekre különböző vastagságú rezisztet pörgettünk fel; 80 nm, 320 nm és 500 nm. A litografálásnál  $10\ \mu\text{m}$ -es apertúrával 20 kV-os sugárral (az áramot 0,0373 nA-nek mértük) dolgoztunk. Dózisnak a labor gyakorlata alapján a 80 nm vastag reziszthez  $180\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ -t, míg a másik kettő esetén  $200\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$  értéket állítottunk be. Az előhívás után ismét betöltöttük a mintákat a litográfba, majd szekunder elektronokkal képet alkotó ún. Inlens detektorral készítettünk SEM képeket. Ehhez már csak 5 kV-ot használtunk.



26. ábra Elektronmikroszkópos kép 380 nm periódusú litografált mintázatról

Az 50 000-szeres nagyítással készült képeken mértem meg az exponálás hatására ténylegesen előhívódott szélességét a litografált sávoknak. Ehhez egy sáv mentén 5 helyen mértem a sáv szélességét, valamint 5 különböző sávot is lemértem egy-egy ponton. Az utóbbi öt mérés átlagát vettem a tényleges adatnak, bizonytalanságát az öt mérés szórásából, valamint az egy sáv esetében mért értékek szórásának kombinálásával számoltam. Kitöltési arányként definiáltam az exponált szélesség és a periódus hányadosát. Az így kapott eredmények láthatóak az 1. táblázatban.

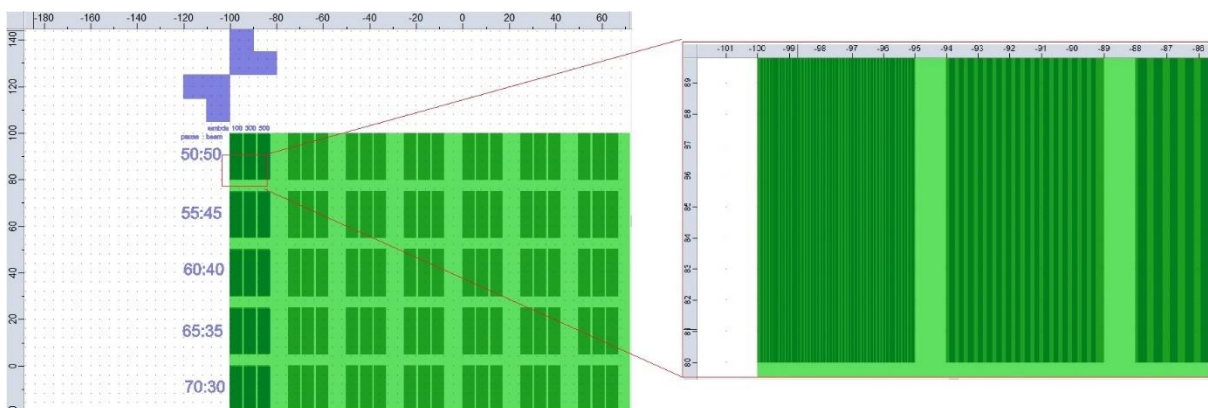
Minta	Reziszt vastagság [nm]	Periódus [nm]	Exponált szélesség [nm]	Bizonytalanság [nm]	Kitöltési arány
1	80	100			
1	80	260	106,4	13,4	41%
1	80	380	191,2	7	50%
1	80	500	267,68	12,9	54%
2	320	100			
2	320	260	153,16	8,8	59%
2	320	380	245,8	6,3	65%
2	320	500	311,12	13,7	62%
3	500	100			
3	500	260			
3	520	380	209,6	18,3	55%
3	520	500	308,88	6,9	62%

1. táblázat A rezisztvastagság vizsgálatának eredményei

Látható, hogy minél vékonyabb volt a reziszt, annál pontosabban kaptuk vissza az elméletileg tervezett litografálási értékeket. Azok a paraméterek esetén, ahol nem szerepel mérési adat, az előhívott mintázatot nem sikerült megvalósítani. Helyenként a tervezettnél nagyobb egybefüggő területek exponálódtak, vagy a sávok összecúsztak. Vastagabb reziszt esetében, ahol a rezisztvastagság akár többszöröse a litografálandó periódusnak ez a veszély jelentősebb, hiszen a PMMA rétegben lévő húzó erő és az előhívás utáni szárítás során fellépő felületi erő a rétegvastagsággal arányosan nő. Adott periódus esetén ezért a vastagabb rezisztbe litografált sávok instabilabbak és így könnyebben tönkremehet a mintázat.

#### 4.2. EBL dózis vizsgálata

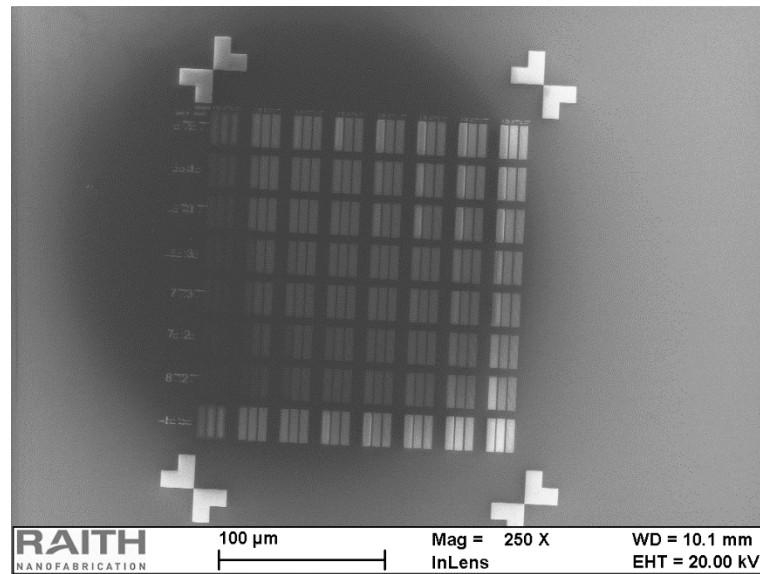
A reziszt vastagsága mellett az alkalmazott dózis is jelenős befolyással bír a tervezett és a litografálás során ténylegesen megvalósuló mintázat viszonyára. Végrehajtottunk ezért egy olyan kísérletet, ahol a használt dózis valamint a litografált rácsmintázat elméleti exponált arányát változtattuk különböző vastagságú reziszt esetén, majd az előhívás utáni arányt vizsgáltuk. Az exponált arányt mind elméleti értelemben, mind a később mért valós adatok esetében az exponált sáv vastagságának és a periódusnak a hányadosaként értelmeztem.



27. ábra Maszkterv a dózis teszteléséhez

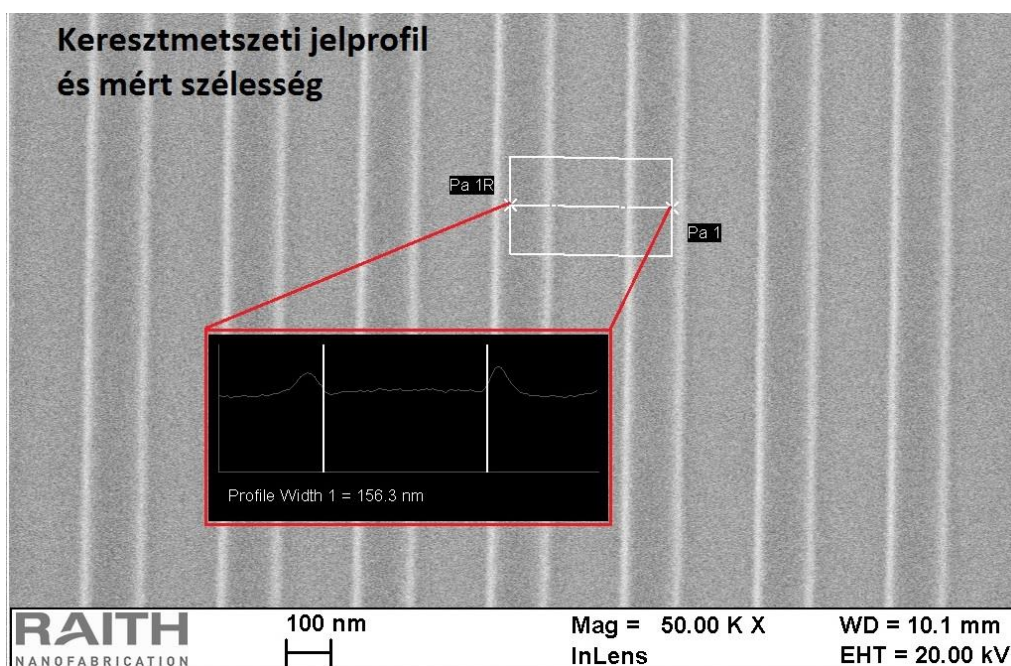
A minták ehhez a vizsgálathoz is az I. típusú minták voltak, amik 1 cm x 1 cm területű kis szilícium lapkák. Ezeket egy nagyobb szelet felfűrészelésével kaptunk. Ezen a szeleten az 1  $\mu\text{m}$  vastag  $\text{SiO}_2$  réteg be lett vonva 150 nm vastagságú alumínium-oxiddal. A litografált mintázat egy paraméterek alkotta négyzethálón elhelyezkedő rácshármasok voltak (27. ábra). A három rácsmintázat periódusa 100 nm, 300 nm és 500 nm. Soronként minden egyes rácshármas folyamatosan növekvő dózissal lett exponálva. A dózis alapértéke  $200 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , egy soron belül ez 0,5-szeresétől változott 1,2-szereséig egy tizedenként emelkedve (8 rácshármas egy sorban). Az oszlopokon belül a dózis állandó volt, itt a tervezett exponálási arányt változtattuk 1:1-től 7:3-ig. Ezt a mintázatot litografáltuk 80 nm, 190 nm és

520 nm vastag rezisztréteget tartalmazó mintára az előző fejezetben bemutatott beállításokkal (apertúra, nagyfeszültség).



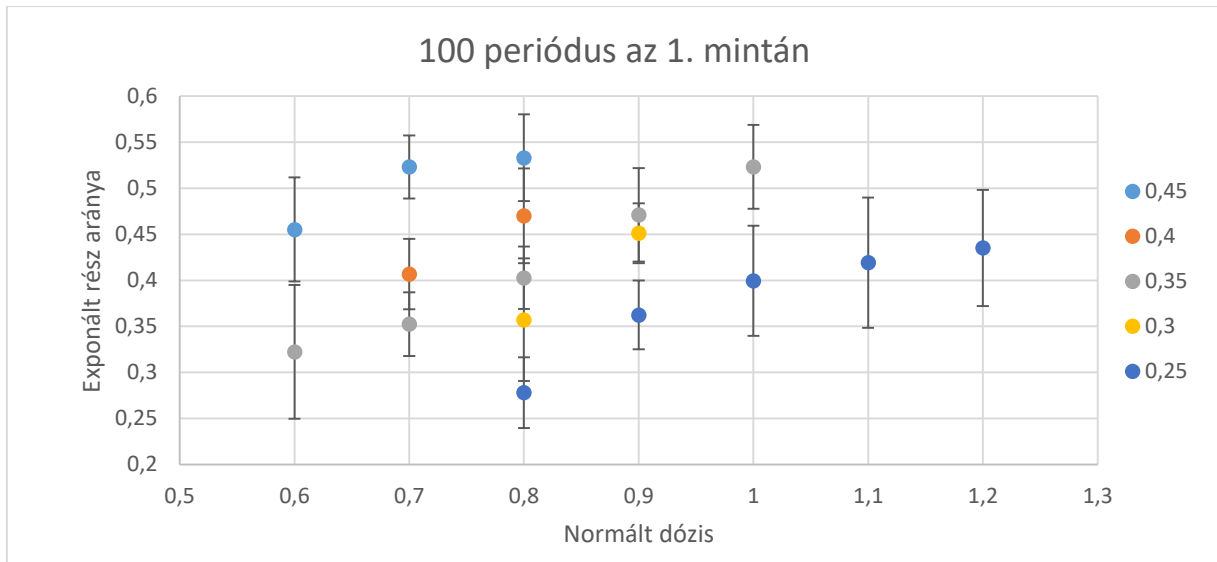
28. ábra SEM mikroszkópos felvétel a litografált mintáról

Az előhívás után SEM felvételeket készítettünk a mintákról, hogy egyrészt minőségi információt kapjunk az egyes paraméterek alkalmazhatóságával kapcsolatban, másrészt a megvalósult exponált arányokat megmérve kvantitatív módon is jellemezzük a mintákat. A SEM felvételeken az exponált részek, mint sávok vastagságának mérésénél az előző fejezetben leírt eljárást használtam, hasonlóan a mérési bizonytalanság becslése esetén.



29. ábra A sávok szélességének mérése

100 nm-es periódus csak a 80 nm vastag rezisztet tartalmazó mintán lett sikeres. Az ezen mintán számszerűen mért exponálási adatokat foglaltam össze a 30. ábrán. A normált dózis esetén 1 egyezik meg a  $200 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ -rel. A különféle adatsorokat az elméleti exponált aránnyal neveztem el a grafikon jobb szélén.

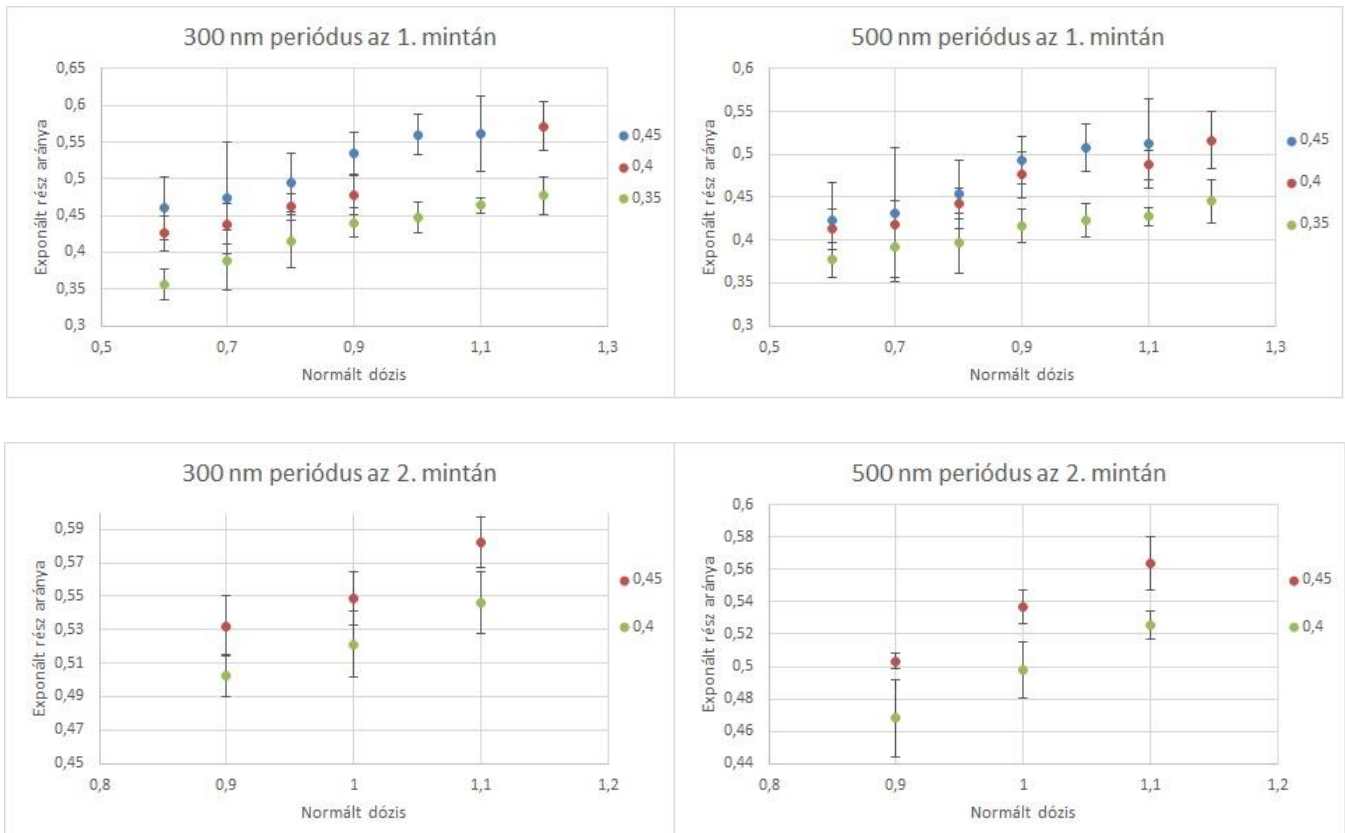


30. ábra 100 nm periódus mérési adatai az 1-es mintán (az adatsorok nevei az elméleti exponálási arányt mutatják)

Láthatóan a várakozásnak megfelelően növekszik az exponált arány mért értéke mind a dózis növelésével, mind a tervezett exponálási arány növelésével. Utóbbival  $140 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  érték esetén egyezik meg az tervezett és a mért adat. A gyakorlatban használt érték esetén, ami  $200 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , a mért arány mindig magasabb. Adott dózis azonban szükséges adott vastagságú reziszt teljes mélységének exponálásához, így egy adott exponálási arány érdekében nem feltétlen az alkalmazott dózis csökkentése a megfelelő módszer.

A 300 nm és 500 nm széles periódusú rácsmintázatok a 80 nm és a 320 nm vastag reziszt esetén a legtöbb esetben sikeresen hívódtak elő. Az 520 nm vastag reziszt esetén a 300 nm periódus leképezése sok esetben sikertelen volt, az 500 nm periódusról készülő felvételek kontraszt viszonyai pedig nem voltak megfelelőek. Ennek oka egyrészt az, hogy a mélyebb árokból az elektronok nehezebben szóródnak vissza a detektorba, másrészt az alumínium-oxidról egyébként is gyengébb a visszaszóródás. Emellett sokszor a sávok élei is határozatlanabbak, s bár az élekről az elektronok visszaszóródása fokozott, de itt ezt a hatást is gyengének bizonyult. Ezen okok miatt az 520 nm vastag reziszt használatát elvetettük ilyen alacsony periódusú rácsok előállításának esetére. A harmadik mintáról ezért nagyrészt csak kisebb nagyítású, minőségi információt adó képet készítettünk, valamint néhány 50 000-szeres nagyítású, melyen az alacsony kontrasztot tapasztaltuk.

A második mintán, ahol 320 nm vastag rezisztet használtunk, több helyen megmértük a rácsok exponált arányait, ezeket az adatokat mutatom be a következő ábrákon.



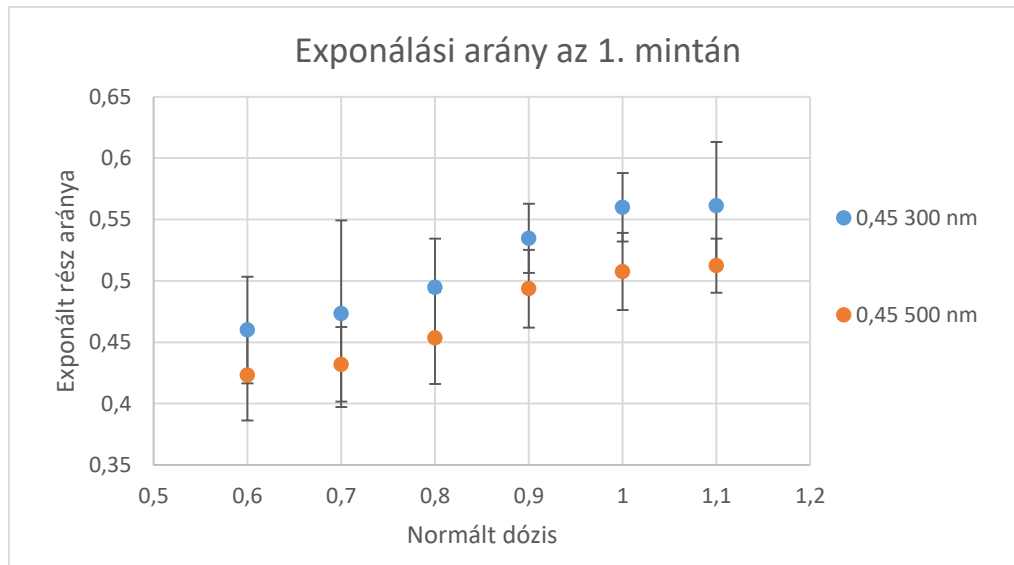
31. ábra 300 nm és 500 nm periódusú mérési adatok különböző mintákon (az adatsorok nevei az elméleti exponálási arányt mutatják)

Ezekben az esetekben is megfigyelhető a dózissal, valamint az elméleti exponált aránnyal növekedő ténylegesen mért exponált vastagsága a rácsoknak. További észrevétel, hogy az 1. mintánál a hiányzó adatok a 0,4-es elméleti arány esetén abból adódtak, hogy a mintázatokról a sávok legvégén készítettünk felvételt. Ezen a részen a sávok elvékonyodnak, így az itt mért adatokat nem tudtuk használni, mivel a mintázat nagyobb, releváns területén ettől eltérő adatot tudtunk volna mérni. Ez a jelenség a 80 nm vastag reziszt esetén nem jelentős.

Másrészt láthatjuk, hogy az egyes adatsorok közötti különbség nem egyforma, holott az elméleti exponálási arányt egyenletesen változtattuk. Ennek lehet az oka, hogy adott beállítások mellett a litografálás közben a sugárnyaláb a pásztázásnál adott szélességben exponál és lépteti a nyalábot. Tipikus esetben ez 4 nm széles sugárvastagságot jelent, így a teljes exponált szélesség négyvel való oszthatósága nem mellékes szempont. Amennyiben nem egész léptetésre jön ki egy litografált terület, abban az esetben nem ismert pontosan, hogy a berendezés hogyan próbálja megvalósítani a beállított

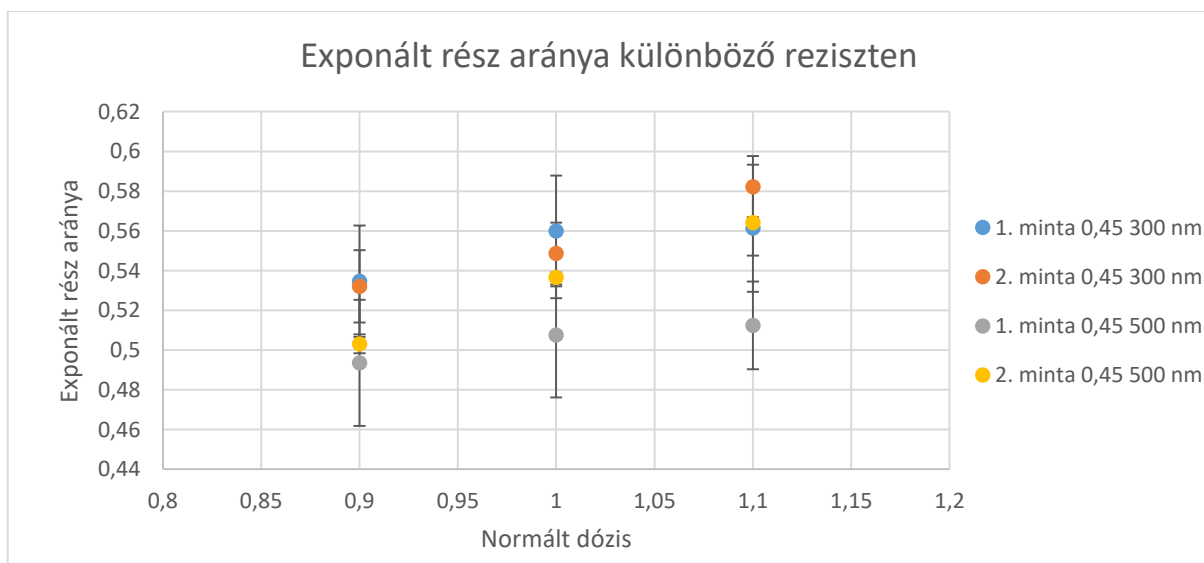


értéket. Ez a jelenség a léptetéssel összemérhető esetben a mérési bizonytalanságot növeli, másrészt kerekítés esetén okozhatja az exponálási arány enyhe eltolódását.



32. ábra Különböző periódusok összehasonlítása

Vizsgáltam továbbá, hogy adott mintán és dózis esetén a 300 nm és 500 nm periódus esetén az exponált arányok hogyan viszonyulnak egymáshoz (32. ábra). Mivel a kiszóródás periódus független, így a sávok kiszélesedése az exponált arányt jobban növelik 300 nm periódus esetén. Ez a grafikonon is jól látható. Emellett még azt is megvizsgáltam, hogy adott litografálási paraméterek esetén a különböző reziszttek mellett mekkora eltérés tapasztalható (33. ábra). Kérdés volt, hogy a kiszóródási jelenség vastag vagy vékony reziszt esetén jelentősebb.

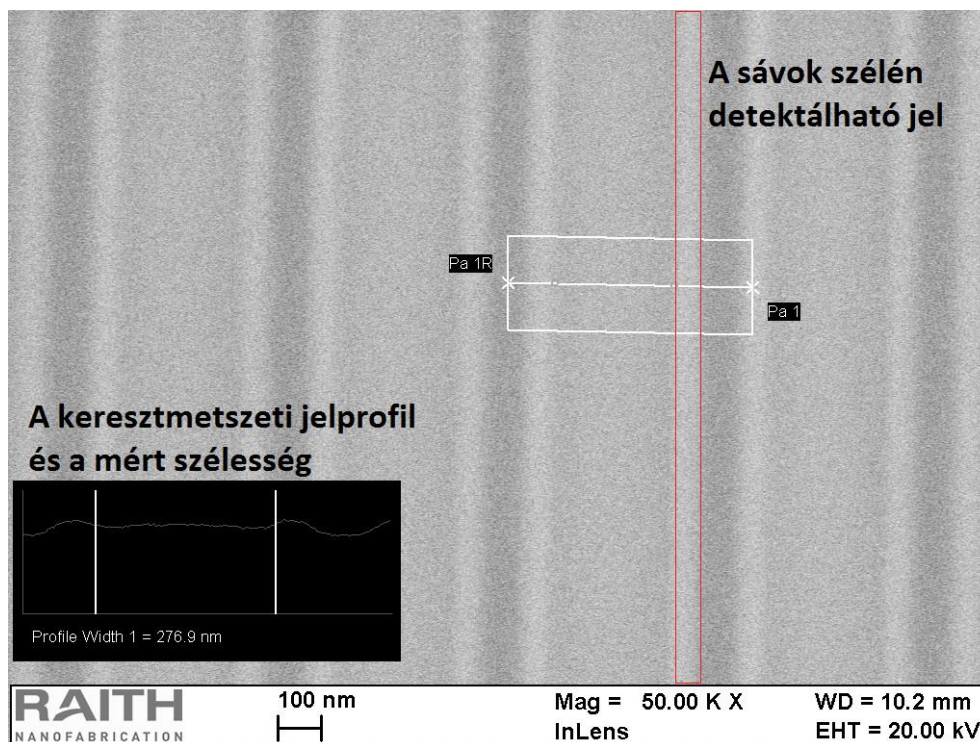


33. ábra A mért adatok minta-függése

A mérési bizonytalanság jelentős volt a tendenciákhoz képest, azonban látható, hogy a dózis növelésével a vastagabb rezisztben nagyobb mértékben nő a kiszóródás következtében tapasztalható szélesedés. További, hasonlóan preparált minták vizsgálatával a statisztikák javíthatók. A következő bekezdésben a kísérlet számunkra fontos tanulságait összegzem.

Néhány száz nanométeres periódus litografálásához az 520 nm rezisztvastagság túl sok, a következőkben ezt nem alkalmaztuk. Nehézség volt sok esetben, hogy a sávok éleiről történő fokozott elektron-visszaszóródás nem egy jól meghatározott, vékony vonal volt, hanem ez kiszélesedett. A távolságmérések során az exponált részbe ezt a területet nem vontam bele (34. ábra). Így bár a mérési módszerem jól definiált, de annak értelmezése, hogy az említett oldalfalakat alkotó, néhol vastagabb sávok a későbbi megmunkálási lépések folyamán hogyan befolyásolják a rácsmintázat kitöltési viszonyait, egyelőre csak jelentős bizonytalansággal becsülhető.

A kapott mérési adatokban ugyanakkor a várt tendenciák számszerűen is leolvashatók, s ezekből későbbi mérésekhez becsléseket lehet tenni. A vizsgált paraméterek változtatása (dózis, elméleti kitöltés) a ténylegesen exponált arányt enyhén befolyásolják, több esetben a mérési bizonytalanságon belül. Megfigyelhető az is, hogy a paraméterek változtatására bekövetkező eltérés a mért értékekben csak egy tartományban igaz, és ezen tartományon kívül, például megvalósíthatósági okok miatt ez a tendencia élesen változik (adott paraméterek esetén a mintázat sikertelen lehet).



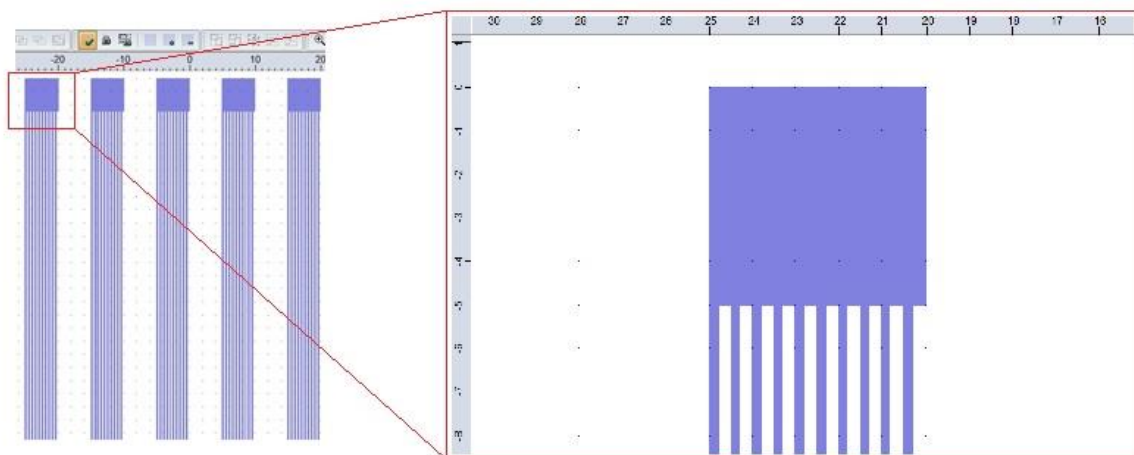
34. ábra Az exponált sávok peremének vastagsága



### 4.3. Marási sebesség vizsgálata

Miután láttuk, hogy a litografálás után közvetlenül a nedves marás nem sikeres, száraz marással terveztük a rácsmintázatot a hullámvezetőbe leképezni. Ehhez alumínium maszkot készítettünk EBL és lift off technika ötvöztetésével. A porlasztás során függőleges élekre is történik anyag leválasztása, ezért többrétegű rezisztbe történő litografálással oldottuk meg, hogy a lift-off megvalósítható legyen. Az alsó reziszt réteg érzékenyebb az előhívó oldalra, mint a felette levő, ezért az előhívás után a mintán maradó rezisztcsávok keresztmetszeti alakja kissé „gomba” alakú, azaz a tövénél kisebb a szélessége, mint fentebbi régiókban. A vékonyréteg leválasztásánál ez egyfajta önárnyékoláshoz vezet, és a rezisztcsávok tövével nem válik le anyag a reziszt oldalára. Emiatt a későbbi, acetonos áztatás során ez a reziszt leoldható a tetejére leválasztott réteggel együtt. A kísérlethez az érzékenyebb rezisztből két réteget, míg a kevésbé érzékenyebből 1 réteget pörgettünk fel, így összességében  $80+80+190=350$  nm vastag szendvicsszerkezetet alkalmaztunk.

A marás vizsgálatához ugyancsak az I. típusú mintákat használtam. Ezekre litografáltam az alábbi ábrán látható mintázatot.



35. ábra Litografálási ábra a marás vizsgálatához

Az ábra 5 db 10 elemű rácsperiódust tartalmaz  $2/3$ -os kitöltéssel, ahol a számláló reprezentálja a litografálandó terület nagyságát. Ezeket a rácsokat egymás mellé pozicionáltam,  $5 \mu\text{m}$  távolsággal elkülönítve, és mindegyik rácsozat végéhez hozzáillesztettem egy  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  nagyságú négyzetet. Utóbbit a nagyobb, összefüggő területen történő lépcsőmagasság későbbi mérése érdekében. 6 mintát állítottunk elő, hogy többféle marási időt tudjunk vizsgálni. A litografáláshoz  $20 \text{ kV}$ -os nagyfeszültséget,  $220 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ -es dózist és  $10 \mu\text{m}$ -es apertúrát használtunk. Az elektronáram mért értéke  $0,0355 \text{ nA}$  volt.

A mintákra ezután 100 nm alumíniumot választottam le elektronsugaras gőzlővel, majd 15 perces acetonos áztatással végeztem el a lift-off műveletet.

A száraz plazmamarást egyrészt a folyamat részeként a megvalósíthatóság miatt kvalitatívan, illetve a mart mélység kontrollálhatósága szempontjából kvantitatív módon próbáltam jellemezni, noha utóbbi tényező az optikai csatolás szempontjából nem kritikus.

A mintákról AFM mikroszkóppal felvételeket készítettem különböző fázisokban, a lift-off lépés után, a plazmamarás után, valamint az ezt követő nedves marás után. Az első kettő közötti különbségből látható, hogy az alumínium, vagy az alumínium-oxid fogy gyorsabban a marás során. Ez azért fontos, mert ez alapján kalkulálható a maszkoláshoz szánt alumínium kívánt vastagsága. Ez ugyanis minél kevesebb, annál rövidebb az ezt követő nedves marási lépés, illetve annál vékonyabb lehet a rétegezett reziszt. Ugyanakkor, ha gyorsabban fogy, mint az oxid, akkor egy bizonyos marási mélységhez ennél vastagabb alumínium réteget kell leválasztani maszknak.

Két mintával, ahol 30, illetve 120 perces marást végeztem, az alábbi adatokat kaptam a sávok, illetve az egybefüggő négyzetek esetén:

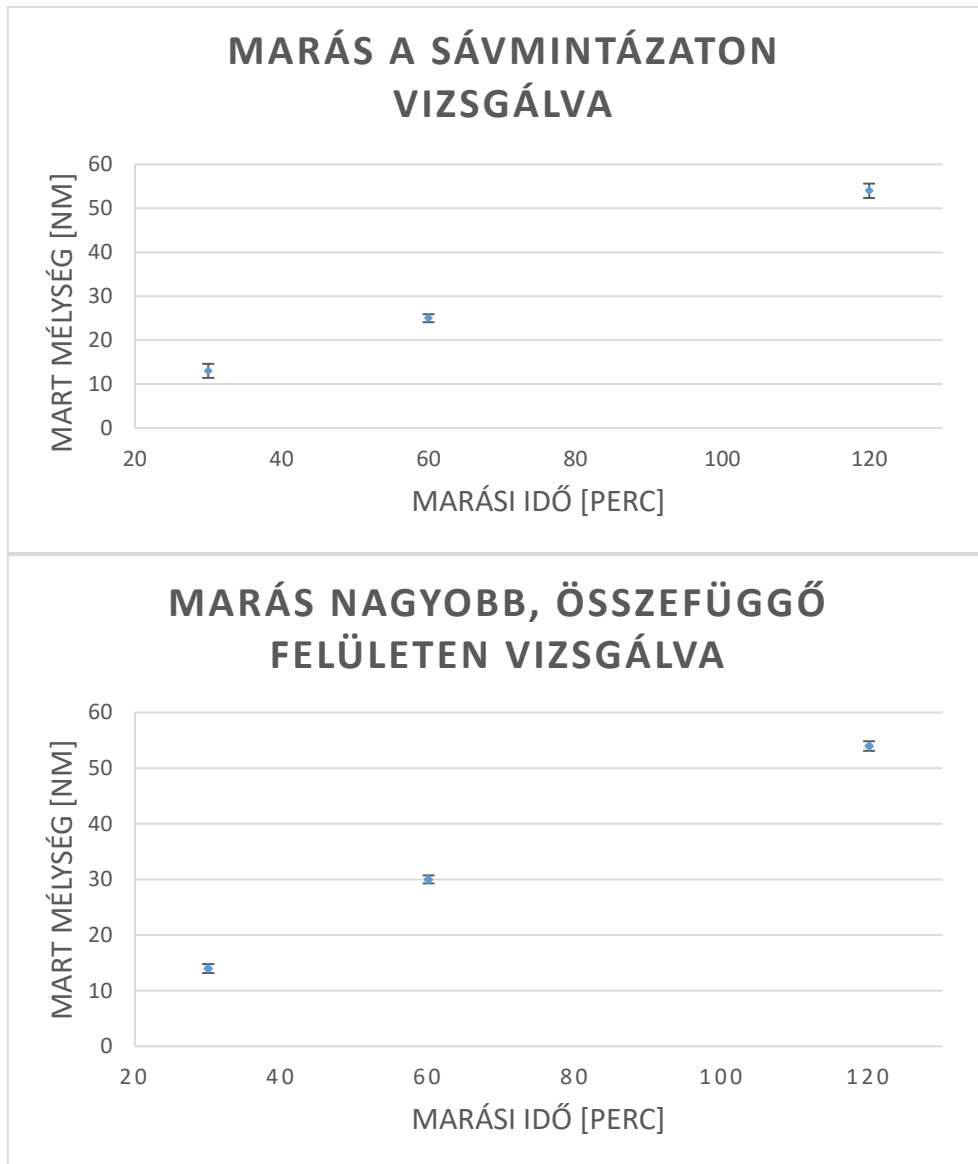
Marási idő [perc]	Sávok magasságának változása [nm]	Négyzet magasságának változása [nm]	Sávok lépcsőmagasságának változása idővel normalva [nm/perc]	Négyzet lépcsőmagasságának változása idővel normalva [nm/perc]
30	3	12	0,09	0,40
120	13	20	0,11	0,16

2. táblázat Az alumínium és alumínium-oxid marási sebességének különbsége

Látható, hogy az adatok szórása igen nagy, főleg a rövidebb marási idő esetén, annyi mindenesetre megállapítható, hogy az alumínium valamivel gyorsabban fogy, mint az oxidja, ezért a marni kívánt mélységgel azonos vastagságú alumínium réteg alkalmazása megfelelő. A fogyás sebességkülönbségének pontosabb meghatározása további mérés elvégzése esetén lehetséges.

Magának az alumínium-oxid esetén vizsgáltam külön a fogyás ütemét. Ehhez három mintát martam különböző marási idővel (30 perc, 60 perc, illetve 120 perc). A száraz marás után a maradék alumínium maszkréteget nedves marással távolítottam el, ezután megmértem a sávok mélységét. Ehhez az AFM felvételeken a Gwyddion szoftver segítségével a képek síkkorrekcióját, és csíkosságra történő korrekcióját elvégeztem, majd 10 sáv magasságát mértem meg 3-3 pontban. Erre a három értékre átlagolva kaptam meg a sávok magasságát majd a 10 sáv magasságára is átlagolva kaptam meg az adott minta esetén a sávmagasság becslést. A mérési bizonytalanságot itt is az egy sávon mért értékek

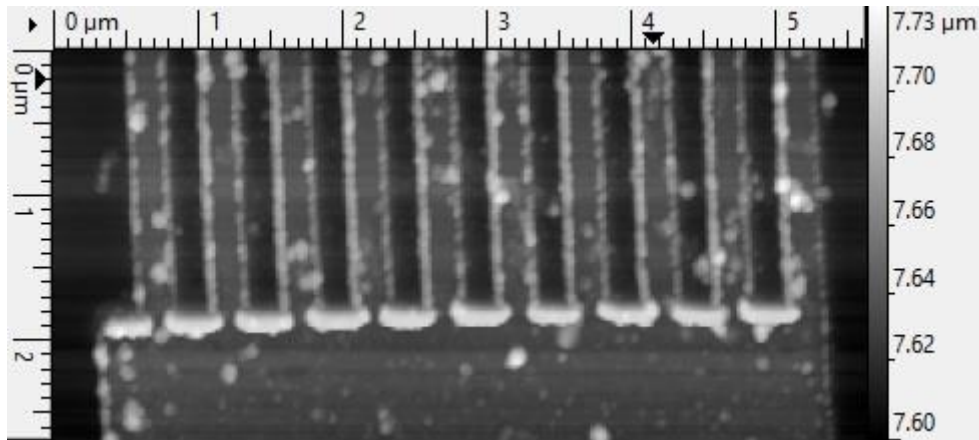
és a sávok adatainak szórásaiból számoltam a bizonytalanságok négyzetösszegének gyökeként. Az eredményeket foglaltam össze a 36. ábrán.



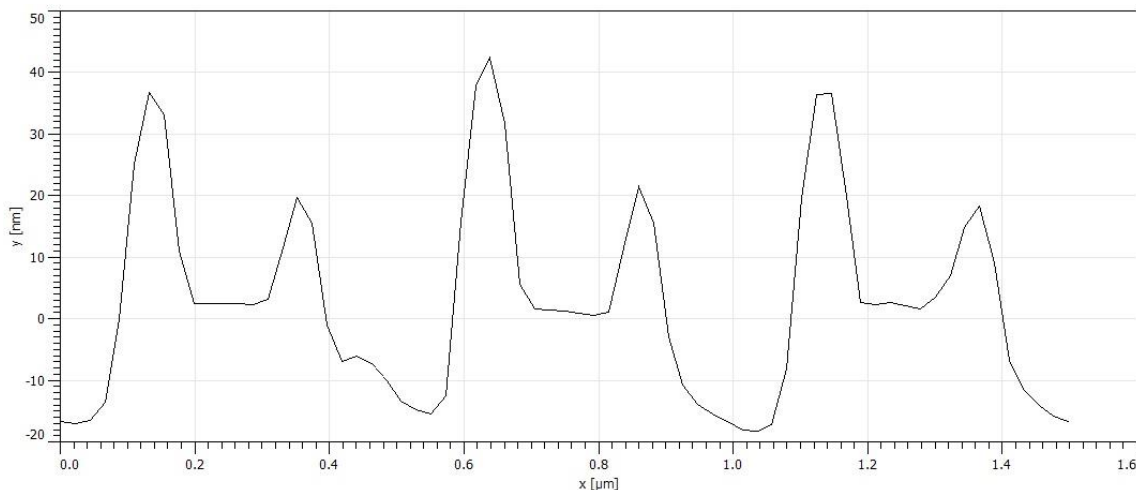
36. ábra Marási sebesség (fent) a sávok esetén, illetve (lent) a nagyobb, összefüggő területen mért adatokkal

A feltüntetett bizonytalanságát csak a mérési adatok szórásából becsültem. Ugyanakkor a mérés alatt mindig figyeltem, hogy a felület homogénebb részein mintavételezzem a magasságot. A marás tökéletlensége miatt ugyanis előfordulhat, hogy a közvetlenül lemart molekulák visszacsapódnak a minta már területén. Ez a jelenség élek mentén adódott jelentősebbnek, illetve a legkisebb marási idő esetén kérdésessé tette a csatoló rács használhatóságát, ugyanis a perem magassága összemérhető, illetve nagyobb volt, mint maga a mart mélység (37-38. ábrák). Későbbi, optikai mérésekhez szánt

minták gyártásánál ezért legalább 60 perces marást alkalmaztunk, hogy ez az effektus ne legyen jelentős.



37. ábra Az élek mentén és sávok végén visszacsapódott anyag a legrövidebb marásidőre



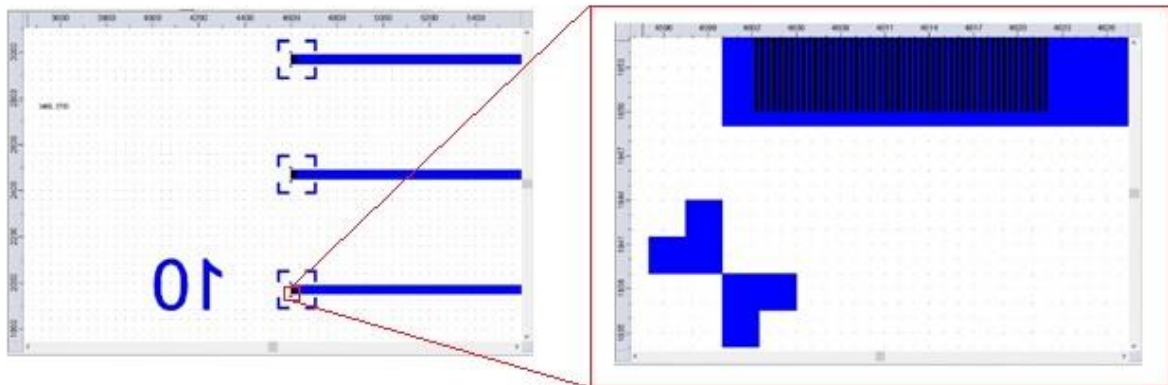
38. ábra Egy sík menti, keresztmetszeti profil a legrövidebb marásidővel készült mintáról

#### 4.4. Rácsmintázat és kitöltési arány vizsgálata

A következő vizsgálat célja az volt, hogy nyomon kövessem a rácsmintázat kitöltési tényezőjének változását az eljárás során. A kísérlethez használt minták a korábban bemutatott II. típusú minták voltak, 1  $\mu\text{m}$  vastag oxidréteggel bevont szilíciumhordozó. Erre került 10 db hosszanti alumínium-oxid csík, melyek ezen a mintán 40  $\mu\text{m}$  szélesek, 10 mm hosszúak és 150 nm vastagok voltak.

Két mintát használtunk a kísérlethez. Az egyikre 3 lépésben  $80+80+190=350$  nm (vastag, „va”), míg a másikra 2 lépésben  $80+190=260$  nm (vékony, „ve”) rezisztet pörgettem fel. A korábban bemutatott lift off technika sikerességéhez elég vastag alsó, érzékenyebb reziszt réteg szükséges (ez a 80 nm-es volt), ugyanakkor a mintázat minél pontosabb leképezéséhez a vékonyabb reziszt kedvezőbb. A két

ellentétes érdekek alapján kell a reziszt felpörgetésének olyan optimális útját megtalálni, ami a megvalósíthatóság mellett minél jobb minőségű minták előállítását teszi lehetővé.



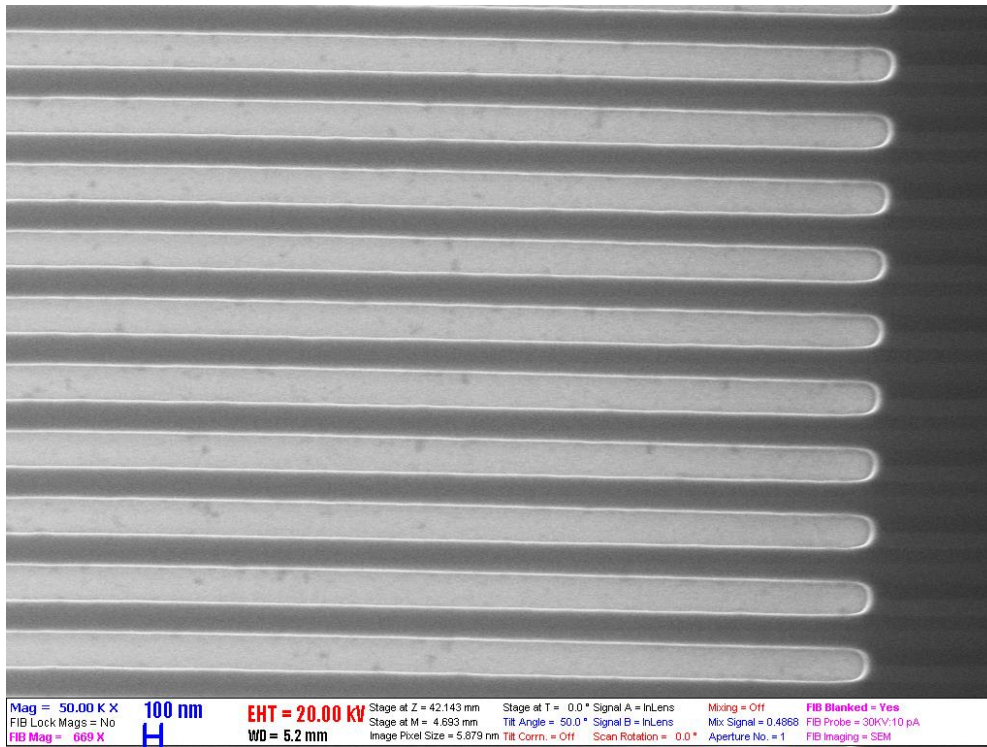
39. ábra A kitöltési arány vizsgálatához készített litográfiai ábra

A mintákra tehát a reziszt felpörgetése után megegyező paraméterekkel litografáltunk rácsmintázatokat. A 10 hullámvezető csík mindkét végén ugyanolyan beállítással exponáltuk a rezisztet, ugyanis az egyik végét meg akartuk nézni SEM mikroszkóppal, hogy a kitöltési tényező változását a litografálás utáni állapotban is ismerjük. Az egyes csíkokhoz használt paramétereket foglalja össze az alábbi táblázat (a kitöltés első tagja az exponált rész). Két dózis értéket, illetve 300 nm periódus esetén három, 400 nm periódusnál pedig két kitöltési arányt vizsgáltunk, amikből a korábbi mérések alapján vártuk, hogy a folyamat végén közel 50%-os kitöltési arányt fogunk kapni. 15  $\mu\text{m}$ -es apertúrával és 20 kV-os nagyfeszültséggel dolgoztunk (az áramot 0,08927 nA-nek mértük).

csík	kitöltés	dózis [ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ]
1	80:220	180
2	100:200	180
3	120:180	180
4	120:280	180
5	140:260	180
6	80:220	200
7	100:200	200
8	120:180	200
9	120:280	200
10	140:260	200

3. táblázat A minták adatai a kitöltési arány vizsgálatához

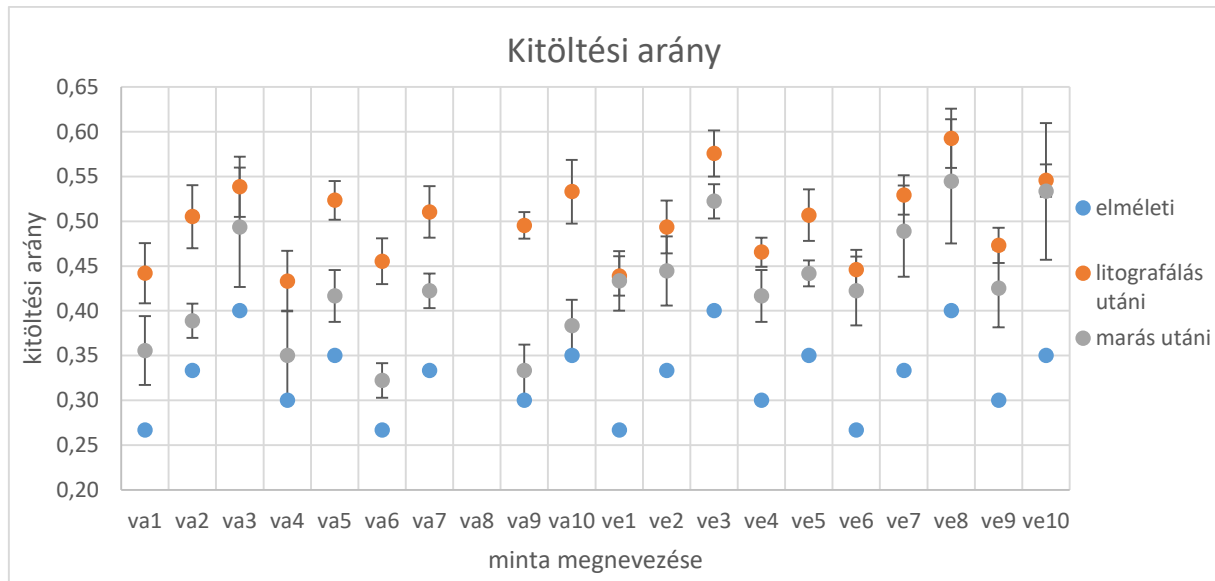
A litografálás után a mintán levő hullámvezető csíkok egyik végén található rácsmintázatokat megnéztük SEM mikroszkóppal. Ezt követően 70 nm alumíniumot választottunk a minták felületére elektronsugaras fizikai gőzöléssel. 15 perces acetonos áztatással végre hajtottuk a lift-off lépést. Így a rezisztet lemosva az alumínium csak a korábban exponált részeken (rácsmintázat maradt a minták felületén). Ezt követte egy 60 perces marás Ar plazmában. A mintán maradt alumíniumot fél órás nedves marással távolítottuk el 5%-os foszforsav használatával.



40. ábra SEM mikroszkópos felvétel a mintáról (400 nm periódus, 140:260 kitöltés)

AFM-mel még a litografálás után megmértem a tényleges rezisztvastagságot, melyre  $350 \pm 20$  nm-t és  $265 \pm 15$  nm-t kaptam a két minta esetén. Emellett a teljes folyamat végén is elvégeztem ugyanezt a vizsgálatot. Megmértem az átlagos marási mélységet, illetve az egyes hullámvezető csíkok végein található rácsok kitöltési viszonyait. A marási mélységre a vastag és a vékony minta esetén rendre  $26,5 \pm 2,6$  nm-t, illetve  $25,3 \pm 2,6$  nm-t kaptam, ami összhangban volt korábbi eredményekkel. A kitöltési tényezőre vonatkozó adatokat a litografálás utáni SEM felvételekről leolvastam, valamint az elméleti értékünkkel együtt az 40. ábrán foglaltam össze. Az elektronmikroszkópos képek esetében a korábbiakhoz hasonlóan mértem a sávok szélességét. 50000-szeres nagyítás mellett megmértem egy sáv szélességét 5-ször, valamint 5 sáv szélességét és az utóbbi öt érték átlaga adta a mért adatomat. A mérési bizonytalanságot az egy sávon, illetve az öt sáv esetén mért értékek szórásaiból számoltam. AFM esetén a képek többségét úgy készítettem, hogy 3-4 sáv legyen látható a nagyobb felbontás

érdekében. Emiatt ez esetben csak 3 sáv szélességéből számoltam a mért adatot. Ezeket a szélesség adatokat az 5 pixelre átlagolt keresztmetszeti profilon mért félérték-szélességgel azonosítottam.



41. ábra A kitöltési arányra kapott eredmények

A vastag minta esetén a 8. csík adatai hiányoznak, ezek a nagyobbik dózissal, az exponált szélességek legnagyobbikával lettek, a vastagabb rezisztet litografálva. A mintázat nem volt sikeres. Látható tehát, hogy a vastagabb rezisztrel a megvalósíthatóság határán sem tudjuk még elérni a szimmetrikus kitöltöttséget. A vékony reziszt esetében a végleges kitöltési arány az 1:2 (exponált:nem exponált területrészt) elméleti arány esetén van a legközelebb a szimmetrikushoz. Az optikai mérésekhez szánt minták előállításához tehát ezt a paraméterarányt választottuk.

#### 4.5. Optikai megfontolások

A BME Atomfizika tanszékének munkatársai (Dr. Beleznai Szabolcs és Sepsi Örs) által végzett optikai szimulációk azt mutatták ki, hogy a korábbi vizsgálatokhoz használt 150 nm vastag hullámvezető réteg túl vékony ahhoz, hogy a becsatolt teljesítmény százalékban mérhető részét vezesse. Ehhez legalább 250 nm vastag réteget kellene használni. Ezért állítottunk elő 300 nm vastag hullámvezetőt tartalmazó mintákat.

Továbbá a szimulációkból kaptuk azt az eredményt, hogy az általunk vezetni kívánt 310 nm hullámhosszúságú UV fényhez a csatoló rács periódusának közel 200 nm-es értéke esetén már megfelelő a becsatolható határfok. Ezek fényében próbáltuk az optikai méréshez szánt mintákon a rácsok periódusát valamivel 200 nm alatti tartományban megvalósítani. Itt meg kell ugyanis jegyezzük, hogy a beesési szög változtatásával a függőlegesen számolt ideális periódushossznál kisebb értékek esetén is megvalósítható a kívánt csatolás.

#### 4.6. Optimalizált technológiai folyamat

Az optikai méréshez szánt mintákat a III. típusú, korábban bemutatott téglalap alakú minták megmunkálásával állítottuk elő. A megelőző esetekhez képest különbség volt, hogy ezeken a mintákon már 300 nm vastag hullámvezető réteg volt.

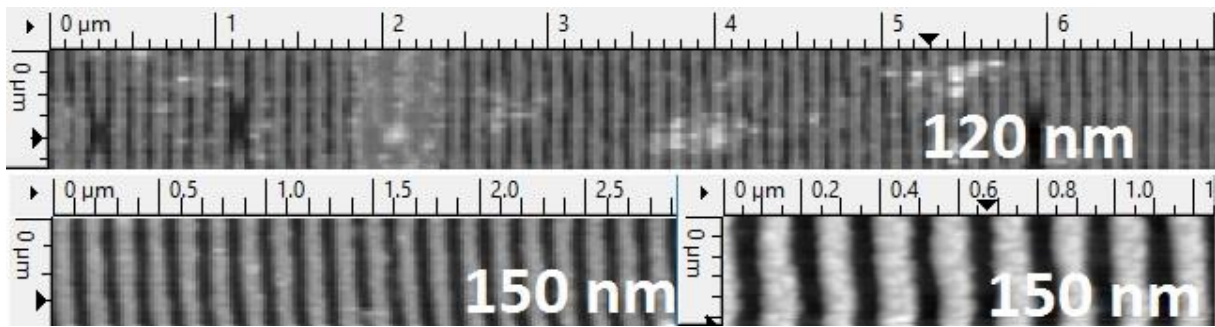
Ezek az ablakolt mintákon tehát az alábbi lépéseket hajtottuk végre a teljes technológiai folyamat részeként, az optimalizálásra vonatkozó korábbi eredményeket is felhasználva (az egyes lépések a módszerek bemutatásánál voltak részletezve, most csak a használt paramétereket írom le):

- A mintákra felpörgetünk 80 nm, majd 190 nm rezisztet
- A litografálást 15  $\mu\text{m}$ -es apertúrával, 20 kV feszültségen, 200  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  dózissal. Adott periódus esetén 1:2 arányú kitöltési aránnyal litografáltuk, majd a mintákat előhívjuk. Hárompontos fókusz és ábraillesztés elengedhetetlen a litografálandó mintázat pontos leképezéséhez.
- 60 nm alumínium leválasztása a mintára elektronsugaras fizikai gőzfázisú leválasztóval.
- 15 perces acetonos áztatással végre hajtjuk a lift-off lépést. Szükség esetén ultrahangos tisztítóval rázhatjuk meg a mintát, hogy az alumínium leválása a rezisztréteggel együtt meginduljon.
- A mintákat argon plazmás szárazmarásnak vetjük alá 60 percen keresztül. Ehhez 120 W-os teljesítményt használunk, és 10 sccm plazmaáram értéket.
- A maradék alumíniumot 5%-os foszforsavval nedves marás útján eltávolítjuk. A marás mintegy 45 percig tart. Optikai mikroszkóppal vizsgálható a lépés sikeressége, továbbá folytatható esetlegesen a marási folyamat.

Ezzel az eljárással végeztünk kísérletet arra vonatkozóan, hogy mekkora a legkisebb periódus, amit a mintára le tudunk képezni.

A fent írt folyamattal állítottunk elő olyan mintákat, amiken a hullámvezető csíkok végein különböző periódusú rácsmintázatot próbáltunk létrehozni. Elsőként egy mintán 120 nm, 150 nm, 210 nm, 270 nm, 330 nm és 390 nm periódusú rácsokat alkalmaztunk. Az összes mintázatot sikerült a hullámvezető rétegbe leképezni, a legkisebb periódus esetén jelentős felületi hibákkal terhelve. Ugyanakkor a 150 nm-es periódusú rács sikeres megvalósítása azt jelenti, hogy az optikai mérésekhez szükséges mintegy 200 nm periódus előállítása lehetséges.





42. ábra Kis periódusokról készült AFM felvétel

## 5. Összefoglalás

A kísérleti munka jelentős részét képezte a berendezések és működési elveik megismerése, a korábbi fejezetekben ezért is szenteltem többet ezek bemutatására. Segítségükkel tehát sikeresen kidolgoztam egy olyan technológiai folyamatot, melyekkel előállítható olyan minta, amivel az elméleti úton számolt optikai csatolás és hullámvezetés megvalósítható. A folyamat egyes lépéseit kvalitatív, és lehetőség szerint kvantitatív módon is jellemeztem a paraméterek kontrollálhatósága érdekében. Így a marási mélység és a kitöltési tényező mérési bizonytalanságon belül történő szabályozása mellett rendelkezésemre áll egy stabil folyamat, mellyel a célként kitűzött 310 nm hullámhosszú fény csatolása optikai szimuláció alapján megvalósítható. A munka következő lépése tényleges optikai mérések végzése. Ennek kísérleti elrendezésének kidolgozását már elkezdtük, illetve előállítottam egy további mintát a kísérlethez a periódus értékeinek változtatásával 160-230 nm közötti tartományban.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Fekete Zoltánnak azt a szakmai és emberi profizmust, mellyel kísérte és segítette TDK munkámat az első elolvasandó cikkektől, a folyamatos konzultáción, mintaelőkészítésen és tervezésen át, a dolgozat megírása kapcsán nyújtott meglátásokkal és korrekciókkal bezárólag.

Köszönöm társtémavezetőmnek, Dr. Lukács István Endrének a folyamatos, időt és energiát nem kímélő segítségét a kísérletekkel kapcsolatban. A berendezések használatába való bevezetést, különös tekintettel az elektronsugaras litográfra, valamint szakmai tanácsait, melyek a munka során számos esetben jelentettek segítséget a továbblépéshez. Köszönöm a dolgozat átnézése kapcsán tett észrevételeit, korrekcióit.

Köszönöm a MEMS Laboratórium dolgozóinak a türelmes és lelkiismeretes segítséget, mellyel támogatták a munkámat, valamint, hogy bármikor fordulhattam hozzájuk kérdéseimmel.

Köszönöm a BME TTK Atomfizika Tanszék munkatársainak, Dr. Beleznai Szabolcsnak és Sepsi Örsnek, hogy szimulációs eredményekkel segítették a minták optikai mérésekre történő optimalizálását.

Köszönöm végül családomnak és barátaimnak a támogatást a munka folyamata alatt.

## Ábrajegyzék

1. ábra. Egyszerűsített kísérleti elrendezés
2. ábra. Sík hullámvezető modell
3. ábra. A tervezett technikai lépéssorozat
4. ábra Atomi rétegleválasztás elve [30]
5. ábra A kezdeti minták keresztmetszeti vázlata (nem méretarányos)
6. ábra Minták optikai méréshez
7. ábra A hullámvezető végén található ablak méretei 40  $\mu\text{m}$ -es mintán
8. ábra Elektronsugaras litográfia lépései
9. ábra Spin-on coating berendezés
10. ábra Vezérlő a spin-on coater-hez
11. ábra Reziszt higításának hatása a felpörgetett rétegvastagságra
12. ábra Elektronsugaras litográf
13. ábra SEM mikroszkóp felépítése [22]
14. ábra Az EBL mintatartó (bal) és a szoftveren megjelenített virtuális képe (jobb)
15. ábra AJA vékonyréteg leválasztó
16. ábra Elektronsugaras párologtatás [31]
17. ábra Load lock kamra a fejjel lefelé behelyezett mintatartóval
18. ábra Plazmamarás elrendezési vázlata
19. ábra A marás ekvi-sebesség térképe szilícium-dioxidra
20. ábra AFM mikroszkóp felépítése [32]
21. ábra AFM mikroszkóp
22. ábra Lift-off technika elve [29]
23. ábra Sikertelen nedves marás (látható a felhasadt rezisztréteg és az összecúszott sávok)
24. ábra Nedves marás eszköztára (teflon mintatartó és a marófolyadék főzőpohárban)
25. ábra A reziszt teszteléséhez használt litográfiai ábra
26. ábra Elektronmikroszkópos kép 380 nm periódusú litografált mintázatról
27. ábra Maszkterv a dózis teszteléséhez
28. ábra SEM mikroszkópos felvétel a litografált mintáról
29. ábra A sávok szélességének mérése
30. ábra 100 nm periódus mérési adatai az 1-es mintán (az adatsorok nevei az elméleti exponálási arányt mutatják)

31. ábra 300 nm és 500 nm periódusú mérési adatok különböző mintákon (az adatsorok nevei az elméleti exponálási arányt mutatják)
32. ábra Különböző periódusok összehasonlítása
33. ábra A mért adatok minta-függése
34. ábra Az exponált sávok peremének vastagsága
35. ábra Litografálási ábra a marás vizsgálatához
36. ábra Marási sebesség (bal) a sávok esetén, illetve (jobb) a nagyobb, összefüggő területen mért adatokkal
37. ábra Az élek mentén és sávok végén visszacsapódott anyag a legrövidebb marásidőre
38. ábra Egy sík menti, keresztmetszeti profil a legrövidebb marásidővel készült mintáról
39. ábra A kitöltési arány vizsgálatához készített litográfiai ábra
40. ábra SEM mikroszkópos felvétel a mintáról (400 nm periódus, 140:260 kitöltés)
41. ábra A kitöltési arányra kapott eredmények
42. ábra Kis periódusokról készült AFM felvétel

## Hivatkozások

- [1] C THOMPSON, Alexander; R STODDART, Paul; JANSEN, E. Duco. Optical stimulation of neurons. *Current molecular imaging*, 2014, 3.2: 162-177.
- [2] Zs. Bérces, K. Tóth, G. Márton, I. Pál, B. Kováts-Megyesi, Z. Fekete, I. Ulbert, A. Pongracz, Neurobiochemical changes in the vicinity of a nanostructured neural implant. *Scientific Reports* (2016) 6:35944
- [3] WIRTH, Justin C. *Silicon grating couplers for low loss coupling between optical fiber and silicon nanowires*. 2011. PhD Thesis. Purdue University West Lafayette.
- [4] IM, Maesoon; CHO, Il-Joo; WU, Fan; WISE, D. Kensall; YOON, Euisik. A dual-shank neural probe integrated with double waveguides on each shank for optogenetic applications. In: *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. IEEE, 2011. p. 5480-5483.
- [5] VIVIEN, Laurent; PAVESI, Lorenzo (ed.). *Handbook of silicon photonics*. Taylor & Francis, 2016. chapter 3.3 and 3.4
- [6] MARCUSE, Dietrich. *Theory of dielectric optical waveguides*. Elsevier, 2013.
- [7] KECK, D.; SCHULTZ, P. *Planar optical waveguide*. U.S. Patent No 3,806,223, 1974.
- [8] TAILLAERT, Dirk, et al. An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38.7: 949-955.
- [9] ROELKENS, Günther; VAN THOURHOUT, Dries; BAETS, Roel. High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay. *Optics Express*, 2006, 14.24: 11622-11630.
- [10] TAILLAERT, Dirk, VAN LEARE, Frederik; AYRE, Melanie; BOGAERTS, Wim; VAN THOURHOUT, Dries; BIENSTMAN, Peter; BAETS, Roel. Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45.8R: 6071.
- [11] ASLAN, Mustafa M.; WEBSTER, A. Nathan; BYARD, L. Courtney; PEREIRA, B. Marcelo; HAYES, M. Colin; WIEDERKEHR, S. Rodrigo; MENDES, B. Sergio. Low-loss optical waveguides for the near ultra-violet and visible spectral regions with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films from atomic layer deposition. *Thin Solid Films*, 2010, 518.17: 4935-4940.
- [12] WEHRL, Hans F.; HOSSAIN, Mosaddek; LANKES, Konrad; LIU, Chih-Chieh; BEZRUKOV, Ilja; MARTIROSIAN, Petros; SCHICK, Fritz; REISCHL, Gerald; PICHLER, J. Bernd. Simultaneous PET-MRI reveals brain function in activated and resting state on metabolic, hemodynamic and multiple temporal scales. *Nature medicine*, 2013, 19.9: 1184-1189.
- [13] LISKE, Holly; QIAN, Xiang; ANIKEEVA, Polina; DEISSEROTH, Karl; DELP, Scott. Optical control of neuronal excitation and inhibition using a single opsin protein, ChR2. *Scientific reports*, 2013, 3: 3110.
- [14] ZHANG, Huijuan; LI, Chao; TU, Xiaoguang; SONG, Junfeng; ZHOU, Haifeng; LOU, Xianshu; HUANG, Ying; YU, Mingbin; LO, G.Q. Efficient silicon nitride grating coupler with distributed Bragg reflectors. *Optics express*, 2014, 22.18: 21800-21805.
- [15] MARCATILI, Enrique AJ. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48.7: 2071-2102.

- [16] ASLAN, Mustafa M. Nanostructuring of alumina optical waveguides by hot water treatment for tuning sensor output. *Thin Solid Films*, 2012, 520.6: 2251-2256.
- [17] RITALA, Mikko; LESKELA, Markku. Atomic layer deposition. *Handbook of thin film materials*, 2001, 1: 103-159.
- [18] TRIPP, Marie K., et al. The mechanical properties of atomic layer deposited alumina for use in micro-and nano-electromechanical systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 130: 419-429.
- [19] Justin Legleiter, Tomasz Kowalewski, Atomic Force Microscopy. In book: *Protein Misfolding, Aggregation, and Conformational Diseases*, pp.315-334
- [20] MEYER, ERNST. Atomic force microscopy. *Progress in surface science*, 1992, 41.1: 3-49.
- [21] [https://www.rp-photonics.com/effective\\_refractive\\_index.html](https://www.rp-photonics.com/effective_refractive_index.html)
- [22] BERČIČ, Boštjan. Introduction to Electron Beam Lithography, Jožef Štefan Institute, 1000 Ljubljana, Slovenia [http://www-f7.ijs.si/uploads/images/SPIN%20-%20OFF%20TEHNOLOGIJE/Electron\\_Beam\\_Lithography.pdf](http://www-f7.ijs.si/uploads/images/SPIN%20-%20OFF%20TEHNOLOGIJE/Electron_Beam_Lithography.pdf) (utolsó letöltés: 2016.09.21.)
- [23] VIEU, C.; CARCENAC, F.; PÉPIN, A.; CHEN, Y.; MEJIAS, M.; LEBIB, A.; MANIN\_FERLAZZO, L.; COURAUD, L.; LAUNOIS, H. Electron beam lithography: resolution limits and applications. *Applied Surface Science*, 2000, 164.1: 111-117.
- [24] TSENG, Ampere A.; CHEN, Kuan; CHEN, C. D.; MA, K. J. Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development. *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*, 2003, 26.2: 141-149.
- [25] GROSSE, Axel; GREWE, Matthias; FOUCKHARDT, Henning. Deep wet etching of fused silica glass for hollow capillary optical leaky waveguides in microfluidic devices. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2001, 11.3: 257
- [26] ZHOU, Bo; RAMIREZ, W. Fred. Kinetics and modelling of wet etching of aluminum oxide by warm phosphoric acid. *Journal of The Electrochemical Society*, 1996, 143.2:619-623.
- [27] HIROKAZU, Kimura; HIFUMI, Tamura. Electron beam evaporator. U.S. Patent No 3,467057, 1969.
- [28] Chemical Compatibility Guide <http://servierlab.vet.cornell.edu/resources/Chemical-Resistance-Chart-Detail.pdf> (utolsó letöltés: 2016.09.21.)
- [29] (ábra) <https://de.wikipedia.org/wiki/Lift-off-Verfahren> (utolsó letöltés: 2016.09.21.)
- [30] (ábra) <http://www.materialstoday.com/nanomaterials/comment/chemistry-at-the-bottom-atomic-layer-deposition/> (utolsó letöltés: 2016.09.21.)
- [31] (ábra) <http://www.albmaterials.com/what-is-e-beam-evaporation.html> (utolsó letöltés: 2016.09.21.)
- [32] (ábra) <http://www.komal.hu/cikkek/2004-10/ipho/feladatok.h.shtml> (utolsó letöltés: 2016.09.21.)
- [33] PERLMUTTER, Joel S.; MINK, Jonathan W. Deep brain stimulation. *Annual review of neuroscience*, 2006, 29: 229.