



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Vándorffy József Áron

**2DEG ALAPÚ SZELEKTÍV  
FREKVENCIAÉRZÉKELŐ  
RENDSZER FEJLESZTÉSE**

Tudományos Diákköri dolgozat

KONZULENS

Dr. Neumann Péter Lajos

BUDAPEST, 2023

# Tartalomjegyzék

<b>Abstract.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Elméleti rész .....</b>	<b>7</b>
2.1. Vegyületfélvezetők .....	7
2.2. 2DEG modulálása környezeti hatásokkal .....	8
2.3. Alkalmazott mérőstruktúrák .....	9
2.3.1. TLM mérési elrendezés .....	9
2.3.2. cTLM mérési elrendezés .....	12
2.4. JFET .....	12
2.4.1. Bemeneti karakterisztika.....	13
2.4.2. Kimeneti karakterisztika .....	13
<b>3. Minták előállítása.....</b>	<b>14</b>
3.1. Rezgőnyelv .....	17
3.2. JFET .....	14
<b>4. Rezgőnyelv végeelem szimulációja .....</b>	<b>20</b>
<b>5. Mérési eredmények.....</b>	<b>23</b>
5.1. TLM mérés .....	23
5.2. cTLM mérés.....	24
5.3. Tranzisztor mérés.....	27
5.3.1. Bemeneti karakterisztika.....	28
5.3.2. Kimeneti karakterisztika .....	32
5.3.3. JFET alapú áramgenerátor létrehozása .....	35
5.4. JFET alapú erősítő áramkör létrehozása .....	36
5.5. Rezgőnyelv mérési eredménye .....	37
<b>6. Összefoglalás és kitekintés .....</b>	<b>40</b>
<b>7. Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>41</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>42</b>

## Kivonat

A mikroelektronika a mai napig egy folyamatosan fejlődő iparág, ami különböző félvezető anyagokra épül. Legnépszerűbb félvezető anyag az iparban a szilícium, de mellette ma már használnak más alternatívákat is, mint a vegyületfélvezetőket. A vegyületfélvezetők néhány elektromos, mechanikai és kémiai tulajdonságukban jelentős eltérést mutatnak a szilíciumhoz képest, mint például a belőlük készült eszközöknek gyorsabb a kapcsolási sebessége, és nagyobb teljesítményhatékonysága [1]. A gallium-nitrid (GaN) is ebbe a csoportba tartozik. Legfőbb előnye, hogy a tiltott sávja háromszor nagyobb, mint a szilíciumé, és ez teszi alkalmassá nagy teljesítményű eszközök készítésére [2]. Az első ilyen tranzisztorokról 2008-ban lehetett olvasni [3], azóta egyre csak gyarapodik az irodalma. Már alkalmazzák kijelzőkben, lézerekben [4] vagy éppen az autóiparban [5].

A kutatásom során AlGaN/GaN heterostruktúrát használtam, melynek előnye, hogy az elektronok ballisztikusan képesek mozogni egy vékony határfelület mentén, ezzel nagy vezetőképességet elérve. Ennek az a magyarázata, hogy az AlGaN és a GaN rétegeknek más a rácsállandója, így a kristályátmenetnél ez a különbség piezoelektromos polarizációt okoz. Ez a hatás egy belső potenciáletteret hoz létre, ami elektron akkumulációt és a heteroszerkezet sáv szerkezetében egy degenerált energiasáv szerkezetet eredményez. Ezen az energiaszinten lévő elektronok képzik az ún. kétdimenziós elektrongázfelhőt (2DEG), itt valósul meg az említett nagy vezetőképesség.

Az AlGaN/GaN vegyületfélvezetővel készítettem tranzisztorokat és MEMS rezgőnyelveket. A rezgőnyelv az őt érő külső mechanikai hullámok hatására alakváltozásra képes, ezzel kristályfeszültséget létrehozva modulálni tudjuk az elektronkoncentrációt a 2DEG-ban. Emellett az alkalmazott heteroszerkezettel adalékolásmentesen lehet aktív eszközt készíteni, például tranzisztort a jel erősítéséhez vagy meghajtásához, ahogy jelen esetben történt. Ezek együtteséből kész MEMS eszköz építhető, akár vibráció mérésére vagy akár cochleáris implantátumba, mivel biokompatibilis anyag.

A dolgozatomban bemutatom MEMS és tranzisztor minták létrehozásának menetét, szimulációját, azokon végzett mérések eredményeit.

## Abstract

Microelectronics remains a continuously evolving industry that relies on various semiconductor materials. The most popular semiconductor material in the industry is silicon, but nowadays, alternative materials like compound semiconductors are also being used. Compound semiconductors exhibit significant differences in some of their electrical, mechanical, and chemical properties compared to silicon. For instance, devices made from them switch faster and are more efficient [1]. Gallium Nitride (GaN) belongs to this group. Its main advantage is that its bandgap is three times larger than that of silicon, making it suitable for high-power device fabrication [2]. The first such transistors were reported in 2008 [3], and their literature has steadily grown. They are already used in displays, lasers [4], and the automotive industry [5].

In my research, I employed AlGaIn/GaN heterostructures. One of the advantages of using these structures is that electrons can move ballistically along a thin interface, resulting in high conductivity. This is explained by the fact that AlGaIn and GaN layers have different lattice constants, causing piezoelectric polarization at the crystal interface. This effect creates an internal potential well, which leads to electron accumulation and a degenerate energy band structure in the heterostructure. The electrons form two-dimensional electron gas (2DEG) at this energy level, responsible for the high conductivity mentioned earlier.

I fabricated transistors and MEMS resonators using AlGaIn/GaN compound semiconductors. The resonator can change shape in response to external mechanical waves, creating crystal strain and allowing us to modulate the electron concentration in the 2DEG. Additionally, the applied heterostructure allows for the creation of active devices without the need for doping, such as transistors for signal amplification or driving, as in the present case. A combination of these components can be used to build MEMS devices, suitable for applications like vibration sensing or cochlear implants due to their biocompatibility.

In my thesis, I present the fabrication process, simulation, and measurement results of MEMS and transistor samples.

# 1. Bevezetés

Egy olyan korszakban élünk, amelyet a technológiai fejlődés határoz meg. A technológia két irányba haladhat, vagy új eszközök kifejlesztése felé, vagy a meglévő eszközök fejlesztése felé. Utóbbit úgy lehet elérni, hogy növeljük az eszközök teljesítményét, vagy csökkentjük az energiafogyasztásukat különböző módszerekkel. Ennek eredményeként a szenzortechnológia területe jelentősen átalakult, új anyagok és innovatív megközelítések jelentek meg. Az egyik ilyen módszer a gallium-nitrid (GaN) alapú kétdimenziós elektrongáz (2DEG) használata.

A GaN, egy széles tiltott sávú félvezető anyag, az elmúlt években jelentős figyelmet kapott a kivételes elektromos és optikai tulajdonságai miatt [6]. Fontos megemlíteni azt a képességét, hogy 2DEG-et képes létrehozni a határfelületén. Megfelelő feltételek mellett, például egy erős elektromos mezőben vagy GaN-et tartalmazó heterostruktúrák használata esetén az elektronok ebben a korlátozott régióban rendkívüli tulajdonságokkal rendelkeznek, ilyen a nagy elektronmobilitás és töltéssűrűség. Ez a két tulajdonság ideális környezet fejlett elektronikai és optoelektronikai alkalmazásokhoz [7]. Ez a sokoldalúság és a GaN alapú 2DEG egyedülálló viselkedése buzdítja a kutatókat arra, hogy minél több helyen alkalmazzák.

A szelektív frekvenciaérzékelő rendszer fontos komponens lehet számos területen, az autóipartól a környezet monitorozásán át az orvostechikai eszközökig. A hagyományos frekvenciaérzékelő rendszerek általában passzív komponensekre, mint például rezonátorokra, szűrőkre vagy speciális anyagokra támaszkodnak a szelektív frekvenciamenet kialakításához [8]. Azonban az ilyen megközelítéseknek gyakran vannak áthidalhatatlan korlátai, amelyek a sáv szélességet, az működési tartományt és az energiaveszteséget érintik.

Ellentétben ezekkel, a GaN-alapú 2DEG szelektív frekvenciaérzékelő rendszerek vonzó alternatívát kínálnak, kihasználva a GaN felületén kialakuló 2DEG réteg egyedi elektronikai tulajdonságait. Az ilyen típusú rendszerek kiváló szelektivitást, nagy sebességű működést és tartományt nyújthatnak, ezzel számos hagyományos érzékelő technológia esetén felmerülő korlátot kiküszöbölve.

Ebben a dolgozatban a frekvenciaérzékelő komponenseinek elkészítését, méréseit, szimulációját mutatom be. A rendszer egy MEMS rezgőnyelvből és

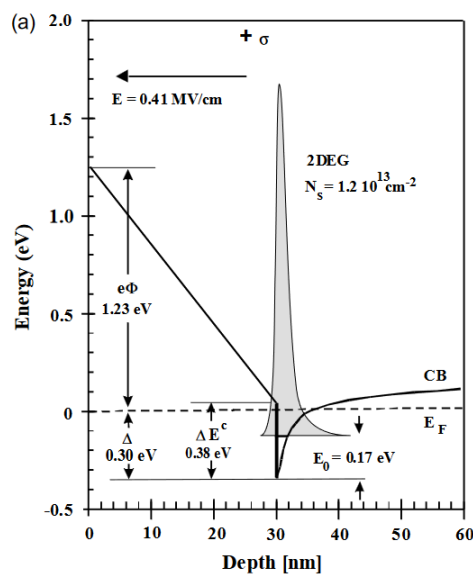
tranzisztorokból áll. A MEMS (MicroElectroMechanical Systems) olyan eszközöket jelent, aminek a mérete kisebb mint 1 mm, de nem kisebb 1  $\mu\text{m}$ -nél, elektromos és mechanikus komponensekből áll, és félvezető technológiai eszközökkel készült [9]. A rezgőnyelv ebbe a kategóriába tartozik, mivel mechanikai változásokat elektromos jelekké alakítja, és a másik két feltételnek is megfelel. A tranzisztorokat ugyanolyan AlGaIn/GaN heterostrukturán hoztuk létre, a későbbi integrálás érdekében. Ezek funkciójukat tekintve áramgenerátoros meghajtásként és jelerősítőként szolgálnak az érzékelő rendszerben.

## 2. Elméleti rész

### 2.1. Vegyületfélvezetők

A nitrid félvezetők, mint a GaN, InN és AlN, a szilícium mellett az egyik legfontosabb félvezető csoport. Ezt a széleskörű felhasználásuk bizonyítja legjobban. Alkalmazzák világítástechnikában, kijelzőtechnológiában, szórakoztató elektronikában, lézerekben, érzékelőkben, nagy teljesítményű rádiófrekvenciás és kapcsoló eszközökben. Ennek oka a kiváló elektromos és optikai tulajdonságuk. [4]

Jelen esetben HEMT-et (High-Electron-Mobility Transistor) csináltam. Ahogy a neve is tartalmazza ezt azt jelenti, hogy az ilyen típusú tranzisztorokban nagy az elektronmobilitás értéke, ami azt jelenti, hogy az elektronok gyorsan mozognak a félvezetőben, gyorsabban, mint például a szilíciumban. A HEMT-ek heterostruktúrát használó FET-ek, a heterostruktúra lényege, hogy a két anyag eltérő szélességű tiltott sávval rendelkezik, ezzel az adalékolt-adalékolatlan szilíciumhoz hasonló sáv szerkezetet alkotva. Az AlGaN és a GaN rétegeknek más a rácsállandója, így a kristályátmenetnél ez a különbség piezoelektromos polarizációt okoz. A polarizáció szabadon mozgó elektronokat és degenerált energiasáv szerkezetet eredményez. Utóbbi az AlGaN réteg közelében történik, ahová az elektronok mozognak, de a nagyobb tiltott sáv miatt nem képesek átmenni a rétegbe. Ezt az elektroncsoportot nevezzük kétdimenziós elektrongázfelhőnek (2DEG – Two-Dimensional Electron Gas). [10]



1. ábra: AlGaIn heterostruktúra sávszerkezete [4]

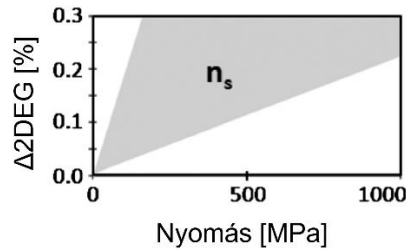
A jó minőségű GaN heterostruktúráknak az aktiválási energiája 9,1 eV körül szokott lenni, bár volt, hogy 12-15 eV-ot mértek. Bár a GaN tiltott sávja háromszor akkora, mint a szilíciumnak, de ez a szám csökken, ahogy az anyag hőmérséklete nő, és ezt figyelembe kell venni tervezés során. [4]

Az általunk használt mintán a vegyületfélvezető rétegeket MOCVD-vel állította elő a Japán NTT Advanced Technologies nevű cég.

## 2.2. 2DEG modulálása környezeti hatásokkal

Ha AlGaIn/GaN heterostruktúrát meghajlítjuk a 2DEG elektronsűrűsége megváltozhat [11]. A piezorezisztív választ a bélyegállandó segítségével jellemezzük, amely az ellenállás egységnyi alakváltozására jutó százalékos értéke. A heterostruktúrában kétféle polarizáció figyelhető meg. Spontán és piezoelektromos. Spontán mindkét rétegben jelen van, piezoelektromos csak a AlGaIn-ben. Ha az anyagban oldalirányú mechanikai feszültség keletkezik, akkor ez megjelenik piezoelektromos polarizációként. A két rétegben fellépő járulékos polarizációt ki kell vonni egymásból, hogy megkapjuk a változás értékét összeségében. Az irodalomban eltér a rétegekre vonatkozó rugalmassági konstans és piezoelektromos együttható, ezért csak közelítő számításokat lehet végezni a 2DEG sűrűségére. [12]



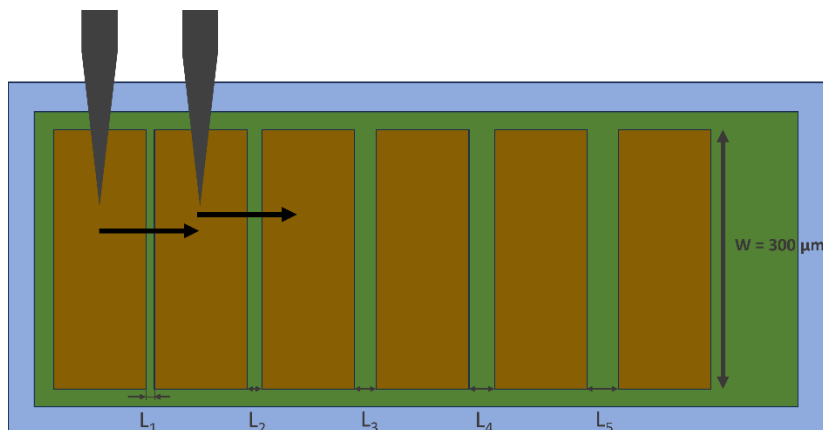


2. ábra: 2DEG sűrűségének változása oldalirányú nyomás függvényében [12]

## 2.3. Alkalmazott mérőstruktúrák

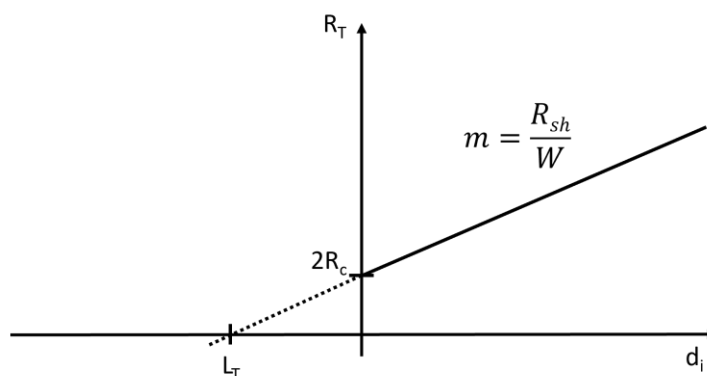
### 2.3.1. TLM mérési elrendezés

Egy félvezető mintánál fém kontaktusok teremtik meg a külvilággal a kapcsolatot. Egy ideális ohmikus kontaktus nincs szignifikáns hatással az eszköz teljesítményére, és a feszültségesés nélkül képes vezetni az áramot. A valóságban az a jó, ha egy tranzisztornál ez az érték jóval kisebb, mint a tömbi vagy a négyzetes ellenállás [4]. A bulk ellenállás egyébként a nyelő és a forrás közötti ellenállás, a négyzetes ellenállás pedig a félvezető felületén mérhető például kéttűs méréssel. A felületi tulajdonságai alapján lehet Schottky dióda vagy ohmikus kontaktus. Utóbbi megmérésére sok mód van, a leginkább használt technika a Transmission Line Method, TLM. Ezt használtam jelen esetben. A félvezető felületén két kontaktus közé feszültséget kapcsolunk, mérőtűk segítségével, és az átfolyó áramot mérjük, elosztva azokat megkapjuk az ellenállást. A méréshez azonos hosszúságú és szélességű, de egymás képest változó távolságban elhelyezett téglalap alapú kontaktusokra (contact pad) van szükségünk. Célszerű, a mérés megkönnyítése érdekében ezeket a távolságokat növekvő sorrendben kialakítani, lásd 3. ábra. A két tűvel sorban megmérjük a szomszédos kontaktusok ellenállását. Fontos még megemlíteni, hogy a TLM minta körülötte részben el kell távolítani az AlGaN-et az esetleges másodlagos hatások elkerülése érdekében. [13]



**3. ábra: TLM pad-ek elrendezése**

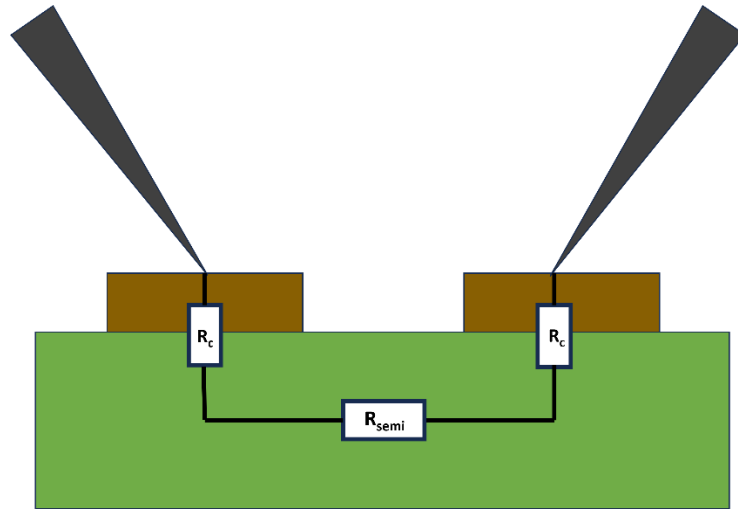
A különböző ellenállás értékeket grafikonon ábrázolva, a kontaktusok távolságának függvényében, egy lineáris összefüggést kapunk, az alábbi ábrához hasonlóan. [13]



**4. ábra: Ellenállás ábrázolása a kontaktusok távolságának függvényében**

Innen megkaphatjuk a 2DEG négyzetes ellenállását ( $R_{sh}$ ), kontaktus ellenállást ( $R_c$ ), fajlagos kontaktus ellenállást ( $\rho_r$ ), és az áramátviteli hosszát ( $L_T$ ). Az áramátviteli hossz, az a kontaktus hossz ahol a legtöbb áram folyik a fém és félvezető között (lásd: ábra feljebb).

$$(1) R_T = \frac{V}{I} = 2R_c + R_{semi} = 2R_c + R_{sh} * \frac{d}{W}$$



5. ábra: Kontaktusok és félvezető ellenállásának modellje

Amikor  $d = 0$ , vagyis a függőleges tengely metszésénél az ellenállás  $2R_c$

$$(2) R_T = 2R_c$$

Így az négyzetes ellenállás:

$$(3) R_i(\Omega.cm) = R_c \times W$$

A TLM analízis eredménye:

$$(4) R_T = \frac{R_{sh}}{W} (d + 2L_T)$$

Ha  $d = 0$ , akkor

$$(5) R_T = 2L_T \frac{R_{sh}}{W}$$

amikor  $R_T = 0$ , az illesztett egyenes és az x tengely metszéspontja kétszerese a transzfer hosszának ( $2L_T$ ).

$$(6) d = 2L_T$$

Egyenlet  $R_{sh}$ -ra:

$$(7) R_{sh} = \frac{R_c W}{L_T} = \text{slope} \times W$$

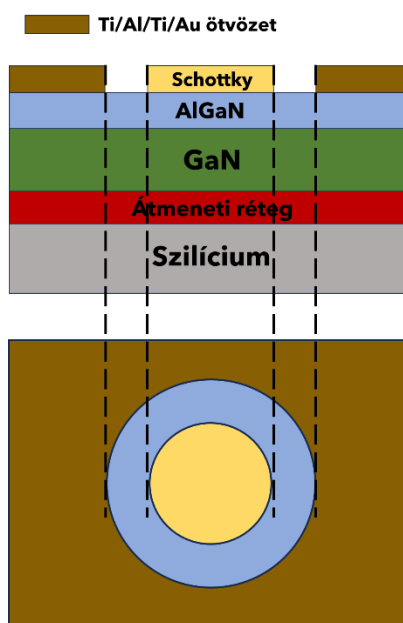
Az ellenállás és az átviteli hossz kiszámítása után a fajlagos kontaktellenállás  $\rho_c$  az alábbi módon számítható:

$$(8) \rho_c = R_{sh} \times L_T$$

[13]

### 2.3.2. cTLM mérési elrendezés

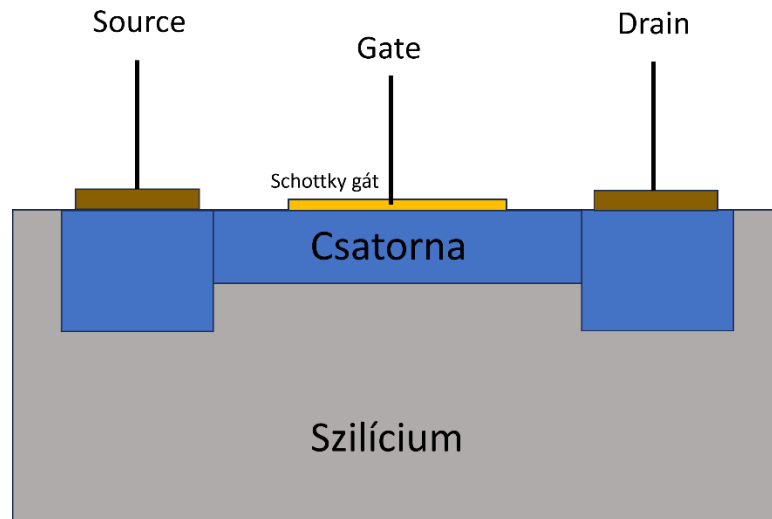
A cTLM (circular Transmission Line Method) méréshez kör alakú kontaktusokat használunk, amelyeket gyűrűs rés választ el az elektromos tértől [14]. A mérés hasonlóan történik, mint a TLM minta esetén, az egyik probe-tűt az egyik alakzat közepére, a másikat mellé az összefüggő területre. Ezekon a mintákon is el lehet végezni az ellenállás számításokat, de én csak a Schottky kontaktusok karakterisztikáját állapítottam meg vele, szem előtt tartva a nyitófeszültség meghatározását. Schottky kontaktus a fém-félvezető átmenetknél jöhet létre, egyenirányító hatású [15]. Ezt a jelenséget használom ki a tranzisztornál.



6. ábra: Keresztmetszete és felülnézete a cTLM struktúrának AlGaIn rétegen

## 2.4. JFET

A JFET egy félvezető aktív eszköz, három terminállal. Kétféle JFET létezik. A pn típusú és a MESFET (MEtal-Semiconductor Field Effect Transistor). A pn típusúnál többségi töltéshordozók a forrás (source) és a nyelő (drain) között haladnak. A kapun (gate) keresztül lehet vezérelni az eszközt. Az általam készített tranzisztorok MESFET-ek, ami azt jelenti, hogy a pn típusúval ellentétben itt a gate junction helyett egy Schottky egyenirányító kontaktus van. [16]



7. ábra: MESFET rétegszerkezet

### 2.4.1. Bemeneti karakterisztika

A bemeneti karakterisztika a gate-source feszültség ( $U_{GS}$ ) függvényében ábrázolt drain áram ( $I_D$ ). Ennek a segítségével tudjuk meghatározni a tranzisztor munkapontját. Az általam fejlesztett (n-csatornás) JFET kiürítéses működésű, ami azt jelenti, hogy amikor  $U_{GS} = 0$  V, akkor a tranzisztor nyitva van, azaz a rajta átfolyó áram maximális. Ez azt jelenti, hogy ennek a tranzisztorok az árama akkor lesz nulla közeli, amikor a gate-re negatív feszültséget kapcsolunk. A feszültség nagyságát nem lehet pontosan előre meghatározni, ezért szükséges ezt lemérni.

### 2.4.2. Kimeneti karakterisztika

A kimeneti karakterisztika a drain-source feszültség ( $U_{DS}$ ) függvényében ábrázolt drain áram ( $I_D$ ). Egy grafikonon általában több gate-source ( $U_{GS}$ ) feszültséghez tartozó görbét ábrázolnak, az így kapott görbék egy fésűre hasonlítanak. Ebből le lehet szűrni az  $I_D$  maximális értékét, és azt a feszültséget, ahol ezt eléri. A kimeneti karakterisztika segítségével lehet munkapontot megállapítani, a lineáris szakaszon kiválasztunk egy pontot és annak az értékeivel tudunk számolni.

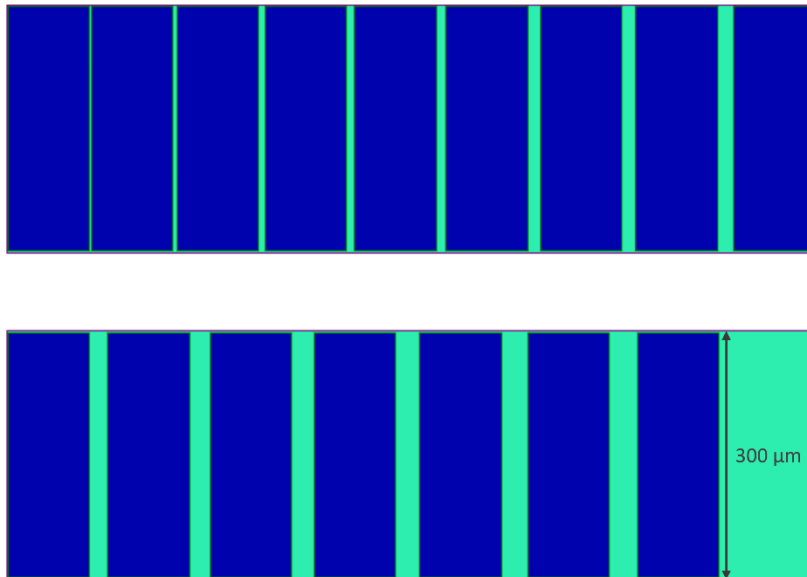
## 3. Minták előállítása

### 3.1. JFET

A két minta, amiket csináltam az A2-es és az A3-as jelölést tartalmaz. A mintázat kialakításához minden esetben Raith 150 márkájú EBL (Electron Beam Lithography – Elektronsugaras litográfia) berendezést használtam. Működésének lényege, hogy egy elektronra érzékeny felületre, úgynevezett rezisztre, elektronsugarat bocsájt ki és a reziszt, típusától függően, oldhatóvá vagy olthatatlanná válik [17].

Al hardmask-ot párologtattam és elmartam az  $\text{Ar}^+$  RIE (Reactive Ion Etching – Reaktív ionmarás) segítségével az AlGaIn/GaN réteget. RIE közben molekulák ionokra esnek szét alacsony nyomáson, ezek a szabadgyökök kémia reakcióba lépnek a céltárggyal, vagy fizikailag bombázzák azt. Előnye, hogy kevésbé hangsúlyos az alámaródás, ami nedves marásoknál jelentős [18]. Ezt a marást azért kellett megtennem, mert nem akarjuk, hogy ez a félvezető réteg az egész felületen jelen legyen, mert olyan hatásokat képes okozni, amelyek rontanák az eszközök minőségét. A mérési eredményekből, és az utólagos AFM (Atomic Force Microscopy – Atomierő mikroszkóp) mérésekből kiderült, hogy ez a marás nem sikerült. A meander magassága csupán 3 nm-nek bizonyult. Az AFM gyakorlatilag egy tű, ami a felületen végighúzva képes érzékelni a legapróbb különbségeket is. A tű egy rezgőnyelvhez van erősítve, ennek a mozgásából lehet megállapítani a változást [19]. A rezgőnyelves chip-re ezt a technológiai lépést optimalizáltam. Egy minta nélküli szelet darabjain csináltam különböző idejű marásokat, különböző teljesítménnyel. Kezdetben 3 nm-es lépcső helyett sikerült 100 nm körülit marni. Mivel a szeleteken az AlGaIn kb 30 nm, ezért ez biztosan megfelel a célnak.

Ezek után a TLM, cTLM mérésekhez szükséges minták, a tranzisztorok lábainak és a meanderek végének ohmikus fémezése (Ti/Al/Ti/Au) következett. Alább látható a TLM mintának a terve.



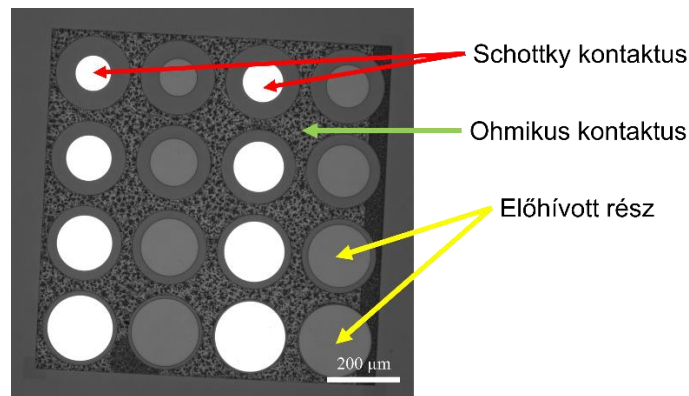
8. ábra: TLM méréshez szükséges mintázat CleWinben, a távolság 2,5  $\mu\text{m}$ -rel nő balról jobbra

A fémzés előtt oxigén plazma segítségével távolítottam el az esetleges szennyeződések a fémzendő területről. Erre azért van szükség, mert a szennyeződések jelenlétében a fém nem fog kellően rátapadni a mintára, mert a szennyeződés árnyékolja a minta azon részét. A folyamat alatt a vákuumtérben rózsaszínes fehér plazma volt megfigyelhető. A rózsaszínes plazmát egy másik elem kölcsönözhet, mert az oxigén plazmája világoskék [20]. A fémzést AJA márkájú vákuumgőzölő/porlasztó-val végeztem. Vákuumgőzöléssel vittem fel 4 réteg fémét. Az ohmikus kontaktushoz Ti/Al/Ti/Au fémeket választottunk le (ebben a sorrendben), 10 nm/100 nm/45 nm/55 nm rétegvastagsággal, 2/10/2/5  $\text{\AA}/\text{s}$  rétegnövekedési sebességgel. A fűtőáramot számítógép vezérli, ahova csak meg kell adni az előbbi paramétereket. Vákuumgőzölés közben érdemes forgatni a mintát, hogy egyenletes vastagságú legyen a fémzés. A nem szükséges fémét lift-off technológiával távolítottam el. A lift-off lényege, hogy a rezisztbe a fémzési kívánt mintázatot világítjuk le, majd fémzés után a maradék rezisztet eltávolítjuk a rátapadt fémmel együtt [21]. Általában törekszünk arra, hogy a fém vastagsága maximum az 1/3-a legyen a reziszt vastagságának, viszont ezt nem sikerült betartani ez esetben, mert 200 nm-es fémréteghez tartozott 300 nm reziszt. Azért érdemes ezt a szabályt betartani, mert ha túl vastag a fém, akkor megmarad az oldalfal a reziszt leoldása után, vagy rosszabb esetben le se jön belőle semmi. Jelen minták esetében a lift-off folyamat során sikeresen eltávolítottam a nem kívánt fémrészeket.

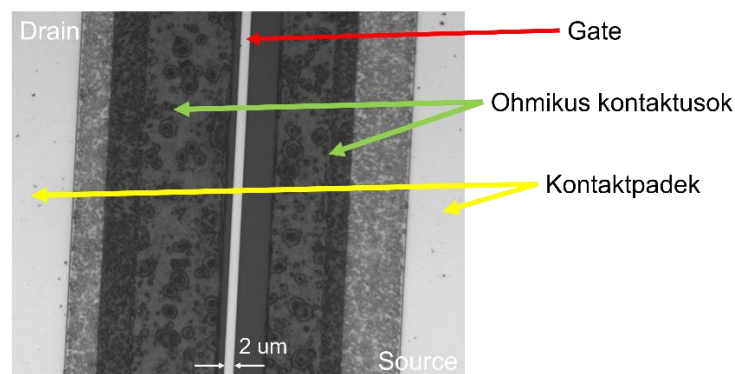
Ezek után a mintákon gyors hőkezelést (Rapid Thermal Annealing - RTA) alkalmaztam, hogy egy ötvözet alakuljon ki a felvitt rétegekből, és létrejöjjön az ohmikus

kontaktus. 10 másodperc emelkedő szakaszt, majd 1 perces stabil szakaszt alkalmaztunk 825 °C-on, N<sub>2</sub> környezetben. Az eszköz izzókkal melegít, nitrogénnel hűtve azokat, amikor szükséges. Az adott hőmérsékletet pirométerrel méri, a szállítóelem kvarcüvegből van, hogy bírja a hőváltozásokat.

A kontaktpadok következtek az előállításuk sorában. Ezek Au/Ti rétegek, és mint a nevük is mutatja a kapcsolat megteremtése a feladatuk a minta és a kívülvilág között. Ezekre helyeztem rá a mérés alatt a mérőtűket. Kontaktpadokat hoztam létre a meanderek két végére, a tranzisztorok lábaihoz és a cTLM mérőpontok felének közepére. Ezenkívül az egyik tranzisztor sort is Au/Ti gate-tel láttam el. A cTLM tesztmintázat másik felét és a másik gate-et arannyal fémeztük annak érdekében, hogy különböző anyagokra nézzem meg az AlGaIn/GaN tulajdonságait. A másik mintára nikkkel-aranyat és palládiumot vittünk fel.



9. ábra: Kialakított cTLM struktúra második fém leválasztása előtt

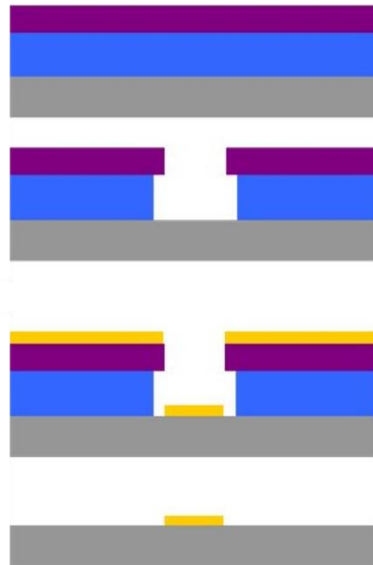


10. ábra: 2 μm-es AuTi gate-tel rendelkező tranzisztor fémezés után

A mintázat kialakításánál két réteg fotorezisztet alkalmaztunk könnyebb lift-offolás érdekében. Először egy 50K-s reziszt vittünk fel 2000-es fordulatszám mellett, 60 másodpercen keresztül. A következő reziszt 600K-s, ezt 4000-es fordulatszámmal,



szintén másodpercig pörgettük fel. Az 50K azt jelenti, hogy a reziszt molekulatömege körülbelül 50 kDa (kiló „dalton”). A rezisztok adatai alapján 300 és 400 nm-es vastag rétegek jöttek létre. A felső 600K-s réteg nehezebben válik oldhatóvá, ezért ezzel a módszerrel a fémezés úgy kerül a mintára, hogy nem érintkezik rezisztalattal. Ez teszi könnyebbé a lift-offolást.

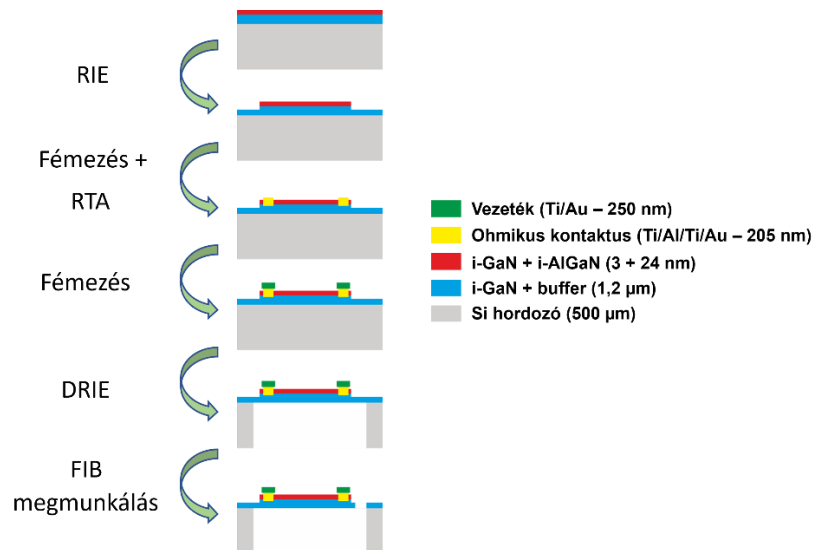


11. ábra: Litográfia és fémezés kétrétegű rezisztalattal [22]

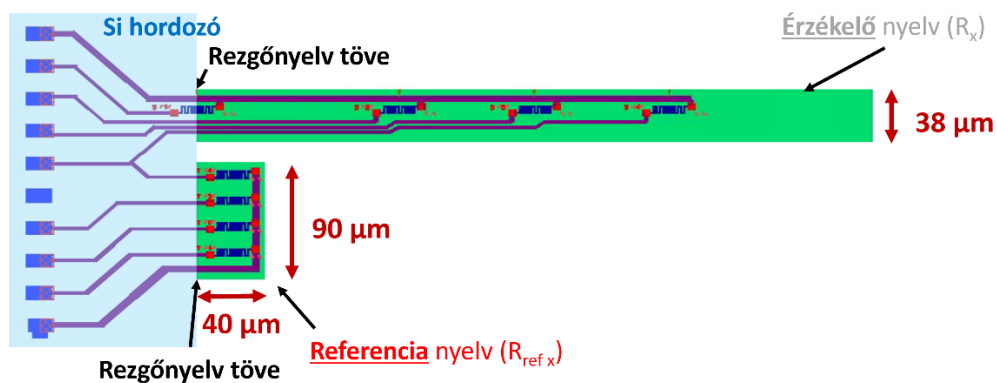
### 3.2. Rezgőnyelv

A rezgőnyelvet a FET-hez hasonlóan reaktív ionmarással kezdtem. Ezt a minta már az általam optimalizált marással készült, amiről később írok. Ezt követték a meanderek végein kialakított ohmikus kontaktusok az előzőekben tárgyaltakhoz hasonlóan. Majd megcsináltam a minta vezetékezését. Ebben ez esetben a titán csak tapadóréteget biztosít az aranynak, mert enélkül az arany nagyon könnyen le tud jönni, amit a tranzisztor gate-jénél tapasztaltunk is. Ahhoz, hogy rezgőnyelv legyen a szilíciumot el kellett távolítani a heterostruktúra alól. Ehhez Deep Reactive Ion Etching-et (DRIE) használtunk. A DRIE-t függőleges struktúrák marására használják, lényege, hogy a plazmamarásban vannak megszakítások, amikor passzíváló réteget viszünk fel, így csökkentve az oldalirányú marást [23]. Az eddig elkészült struktúrát már csak megfelelően körbe kellett vágni, ehhez fókuszált ionsugarat (FIB – Focused Ion Beam) használtam. A FIB is egy olyan folyamat, amivel ábrát készítünk a mintára, de reziszt helyett ez a módszer közvetlenül eltávolítja az anyagot porlasztással, így nem szükséges maszk [24].

Ahogy 5. ábrán is látható, a használt szelet összetétele a következő. A hordozó 500  $\mu\text{m}$  szilícium, rajta köztes buffer réteg, azon adalékolatlan GaN, melyeknek együttes vastagsága 1,2  $\mu\text{m}$ . Ezt követi a szintén intrinsic AlGaN 24 nm-es vastagsága, végül a bevonatot képző 3 nm vastag GaN, amely védőréteggként szolgál.

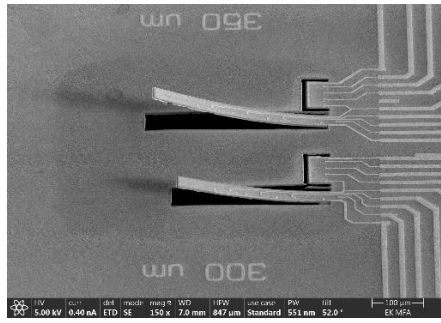


12. ábra: A rezgőnyelv elkészítésének lépései



13. ábra: Rezgőnyelv mintázata

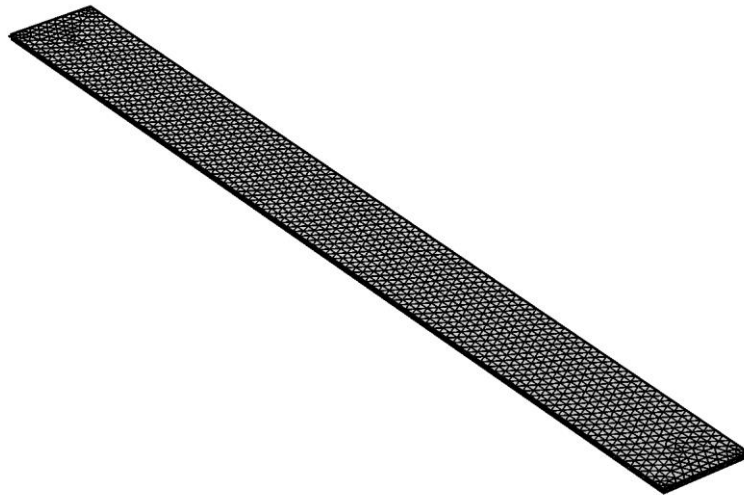
A 40  $\mu\text{m}$  hosszú rezgőnyelv a meander szerkezeteknél tapasztalható sajátmelegedésből (*self-heating*) adódó eltérések kiküszöbölésére való. Jelen esetben az érzékelő nyelv meanderei és a referencia nyelv meanderei feszültségosztót alkotnak, mivel ellenállásuk ugyanakkora, ezért a melegedésből adódó ellenállásváltozást felezi. Ily módon pontosabb értéket kapunk. Többféle hosszúságú rezgőnyelvet készítettem, 200  $\mu\text{m}$ -tól egészen 450  $\mu\text{m}$ -ig, 50  $\mu\text{m}$ -es lépésekben. A meanderek helyzetét a végeselem szimuláció alapján határoztam meg.



14. ábra: 300 és 350 um hosszú rezgőnyelvek elektronmikroszkópos képe

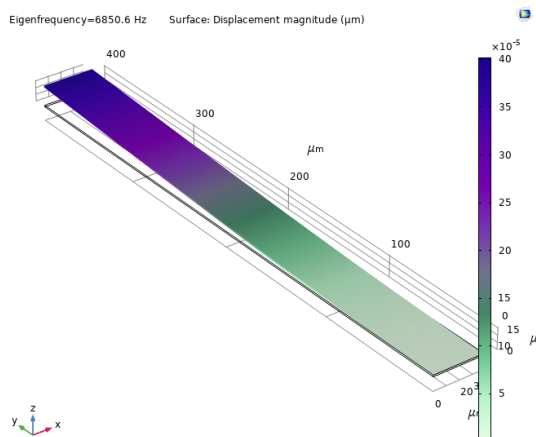
## 4. Rezgőnyelv végeelem szimulációja

A végeelem szimulációhoz a Comsol Multiphysics 5.6-os verzióját használtam. A programon belül létrehoztam a rezgőnyelv modelljét, ami egy 400  $\mu\text{m}$  hosszú, 38  $\mu\text{m}$  széles, 1,23  $\mu\text{m}$  magas téglatest. Beállítottam a test térhálóját.

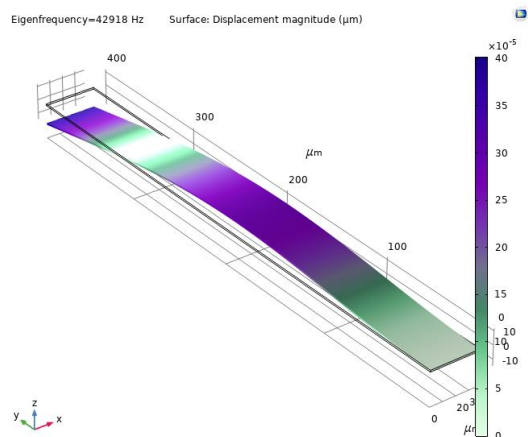


15. ábra: Comsol-os térháló ábra a rezgőnyelvről

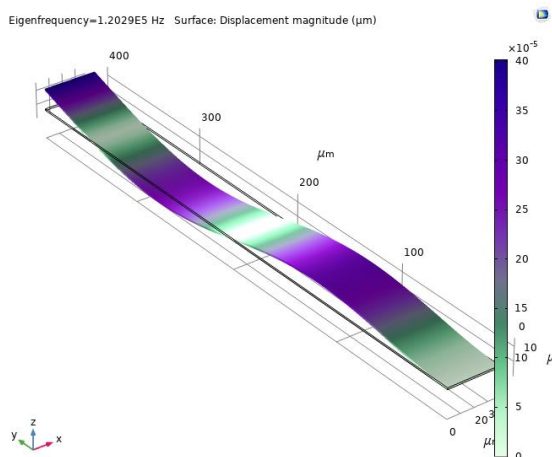
A térháló azokat a pontokat határozza meg, melyekre a program a differenciálegyenleteket oldja meg. Többféle finomságú háló van, én a „Fine” finomságot választottam, mert ez is megfelel ennek a modellnek, mert ennyi pontból is meg lehet állapítani, hogy hol kell nézni a változást a szerkezetben. Az elején kiválasztottam, hogy a Solid Mechanics modullal szeretnék dolgozni, ezen belül is a modul sajátfrekvenciáját (eigenfrequency) választottam. Az anyagot Wurtzite kristályszerkezetű GaN-nek állítottam be, érdekes módon a program nem tartalmazta ehhez az anyaghoz a Poisson-tényezőt és a Young modulust melyek szükségesek lettek volna a szimulációhoz, ezért ezeket manuálisan vittem be. A szimulációval az első hat sajátfrekvenciát határoztam meg, íme az első négy.



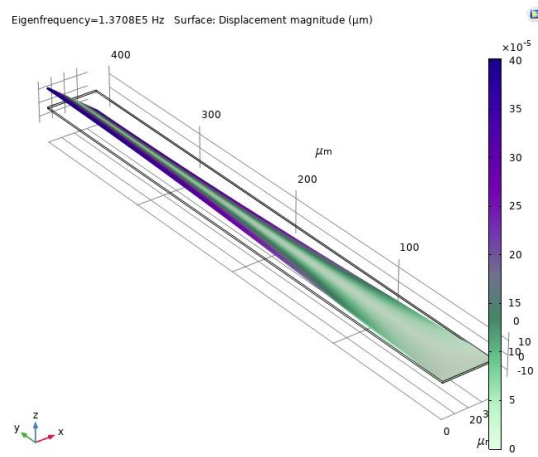
**16. ábra: Első felharmonikus 6,85 kHz-nél**



**17. ábra: Második felharmonikus 42,9 kHz-nél**



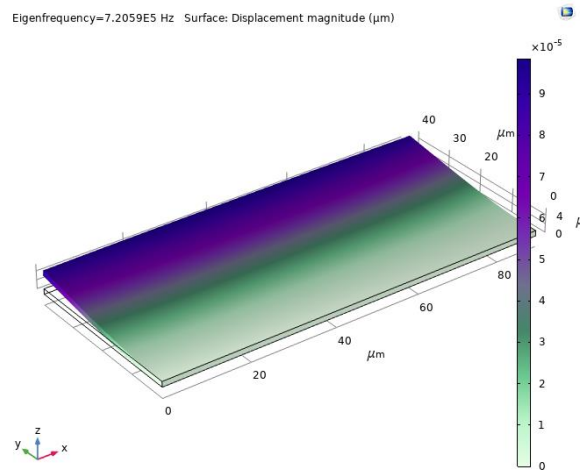
**18. ábra: Harmadik felharmonikus 120,3 kHz-nél**



**19. ábra: Negyedik felharmonikus 137,1 kHz-nél**

Az ábrákon a különböző szín különböző eltérést jelent a nyugalmi állapotból, a nagyságát a mellettük lévő skála jelzi. A legtávolabbi pontokban van a legnagyobb mechanikai feszültség, ezért itt változik legtöbbet a 2DEG, erre a részre szükséges tervezni a meandereket, hogy megfelelő változást kapjunk elektromosan is. Az első három harmonikus longitudinális rezgéseket eredményez, amelyekre nekünk szükségünk van. Az utolsó ábrán a nyelv csavarodását láthatjuk a frekvencia hatására, ebből nem tudunk a meanderes módszerrel információt gyűjteni.

Ezt a szimulációt megcsináltam különböző méretekre is, a referenciára is.



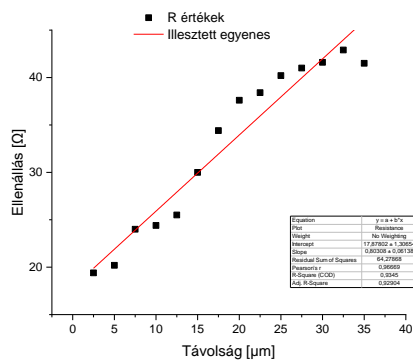
**20. ábra: Referencia rezgőnyelv első felharmonikusa 72,1 kHz-nél**

Ahogy az szimulációs ábrán is látszik az eltérése negyed akkora, mint az érzékelő nyelvé, és a sajátfrekvenciája is alacsonyabb. Ezen okok miatt a kimeneten jóval kisebb hatása van, a valóságban erre a rezgőnyelvre készült meanderek hasonló melegedési tulajdonságokkal bírnak, mint az érzékelő nyelven lévők, ezért remekül lehet használni őket a melegedés kompenzálására.

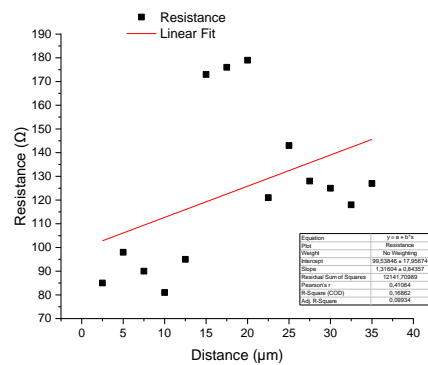
## 5. Mérési eredmények

### 5.1. TLM mérés

A kialakított mintázaton megmértem a szomszédos kontaktusoknál az ellenállást a legkisebttől kezdve végig a legnagyobbig. Ehhez Keithley 2450-es műszert használtam, a két force pontjára hátul csatlakoztattam a probe BNC csatlakozóit. Mivel ellenállás mérésről van szó a polaritás nem számít. A műszerrel ellenállást mértem, áramforrásként használtam. A tűket mikroszkóp alatt állítottam be. A mért eredményeket az alábbi grafikonokon ábrázoltam. Az A3-as mintán nagyobb ellenállásértékeket mértem, három nagyon kiugró mérési ponttal. Ennek ellenére a pontok átlaga lineáris növekedést mutat.

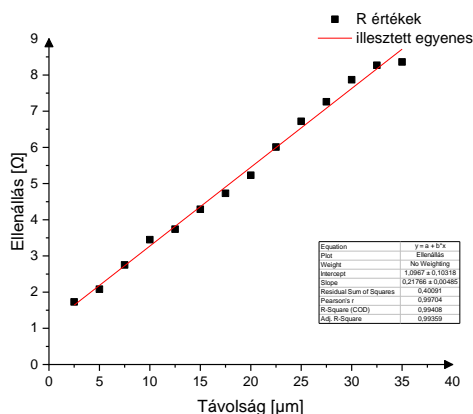


21. ábra: A2-es mintán történt TLM mérés ábrázolása

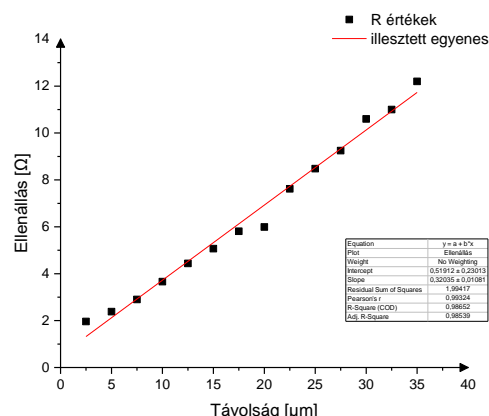


22. ábra: A3-as mintán történt TLM mérés ábrázolása

Összehasonlításképpen az optimalizált marással készült mintákon is elvégeztem ezt a mérést. Ezen a két meglehetősen hasonló eredmények születtek, és az ezekből számított értékek is közelebb állnak az elvárt értékekhez.



23. ábra: G29-es mintán történt TLM mérés ábrázolása



24. ábra: G28-as chip mintán történt TLM mérés ábrázolása

Név	A2	G28	G29
<b>W - Kontaktszélesség</b>	300 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$
<b>R<sub>c</sub> - Kontaktellenállás</b>	8,94 ohm	0,5485 ohm	0,2596 ohm
<b>R<sub>SH</sub> – Négyzetes ellenállás</b>	241 ohm	65,31 ohm	96,09 ohm
<b>L<sub>t</sub> – Átviteli hossz</b>	11,13 $\mu\text{m}$	2,52 $\mu\text{m}$	0,810 $\mu\text{m}$
<b><math>\rho_c</math> – Fajlagos kontaktellenállás</b>	2,985 $\mu\text{m}^2$	414,7 $\mu\text{m}^2$	63,04 $\mu\text{m}^2$

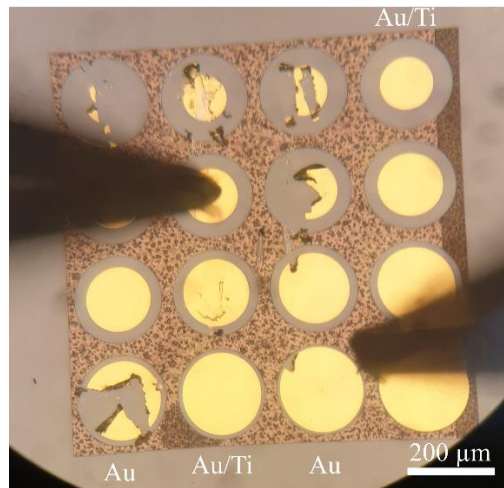
1. táblázat: TLM mérésből számolt adatok

## 5.2. cTLM mérés

A cTLM méréshez az előző elrendezést használtam, de ellenállás helyett feszültség-áram karakterisztikát mértem. A tűket úgy helyeztem le, hogy a Schottky diódának megfelelően, a nagyobb feszültségen lévő pólust raktam a fémezésre, a másikat pedig az ohmikus kontaktusra. Feszültségforrás üzemmódban használtam a Keithley berendezést és áramot mértem. 100  $\mu\text{A}$ -es áramkorlátot állítottam be, mert nem tudtam mennyire terhelhető ez a nanostruktúra. A cTLM mintán az első és a harmadik oszlop tartalmazza az arany Schottky kontaktust, a második és a negyedik az arany-titán kontaktust. Az arany fémezés könnyen feljött, ahogy az alábbi ábrán is látszik. A titánnak

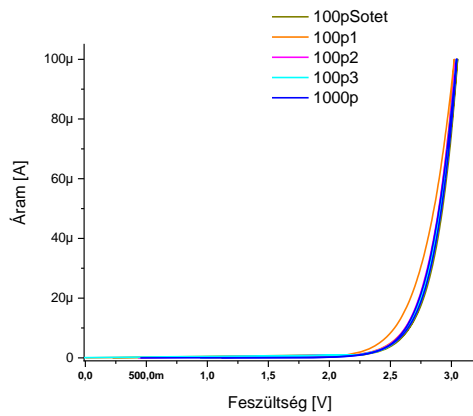


viszont jobbak a tapadási tulajdonságai, cserébe levegőn oxidálódik, ezért kell bevonni arany réteggel. Ebben az esetben a mérési pontokat a műszer sweep funkciójával vettem fel, dual-linear módban, hogy látszódjon a hiszterézis, amennyiben van. A dual-linear mód azt jelenti, hogy a mérés kétszer történik egyszer csökkenő, majd növekvő értékekkel a gerjesztési oldalon. Egy arany és egy titán-arany átmenetet sikerült lemérni.

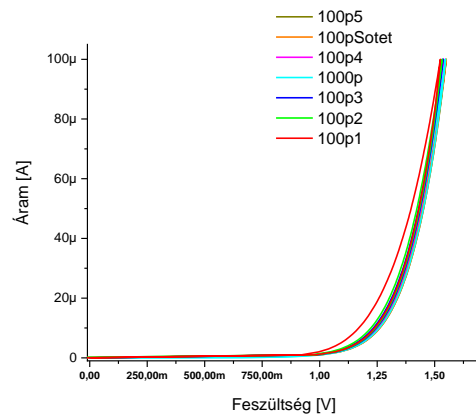


**25. ábra: cTLM minta mérése**

Az arany fémezésű cTLM mérés eredményeit ábrázolva észrevehető a dióda karakterisztika, sikerült a mérés. Ebben az esetben legalább kétszer 100 mérési ponttal dolgoztam, összekötve ezeket a pontokat kaptam az alábbi karakterisztikát. A narancssárga tér el jelentősen a többitől, ezt mértem elsőnek, valószínűleg ezért van ekkora hiszterézise. Ez lehet például az határretegeknél történő anyagváltozás miatt, ami később megszűnt.

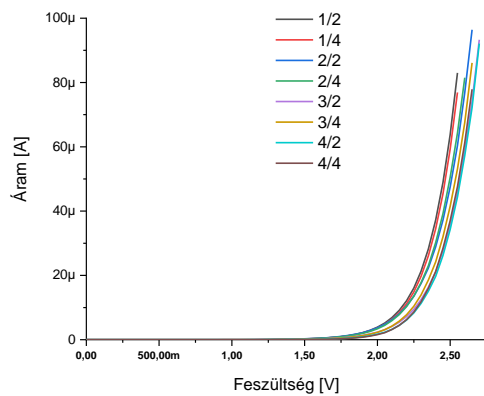


**26. ábra: Au Schottky dióda, 1 db, több méréssel**

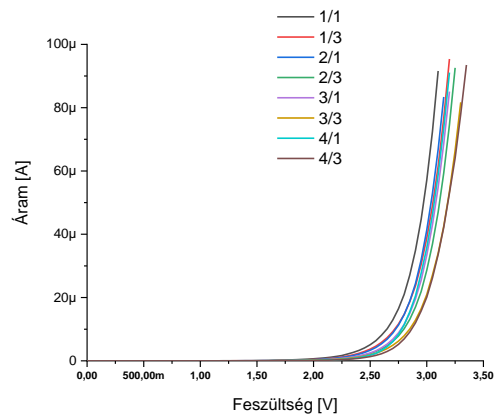


**27. ábra: Au/Ti Schottky dióda, 1 db, több méréssel**

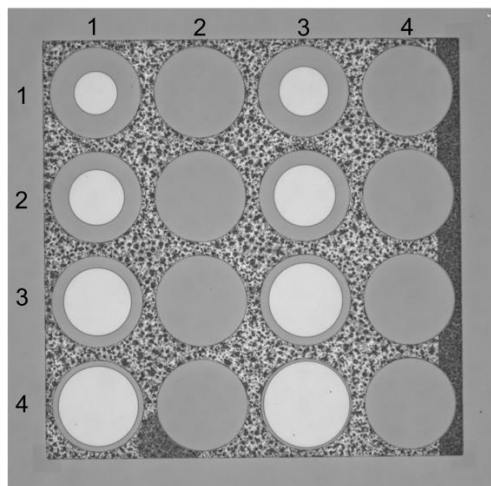
Az Au/Ti fémzésű tesztmintázat grafikonjáról látszik, hogy alacsonyabb nyitófeszültséggel (1,2 V) rendelkezik, mint az Au (2,5 V). Ebben is esetben hasonló hiszterézis figyelhető meg az első mérésnél, ami jelenleg a piros görbe. Mindkét Schottky dióda esetében megmértem lekapcsolt világítás mellett, de nem mutatott jelentős eltérést a karakterisztikában. A fémzésen nehezen jutnak át a fotonok.



**28. ábra: Palládium Schottky dióda; a jelmagyarázat a cTLM struktúrán belül való elhelyezkedést mutatja (sor/oszlop)**



**29. ábra: Nikkel Schottky dióda; jelmagyarázat mint az előzőn (sor/oszlop)**



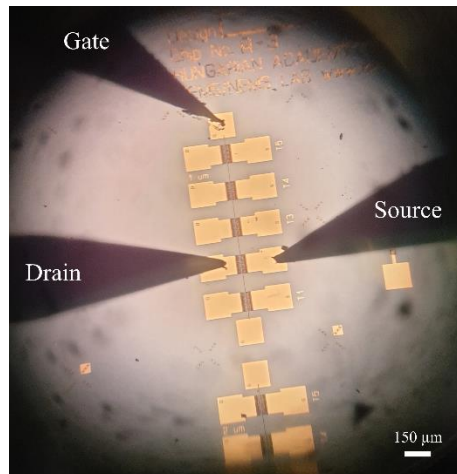
**30. ábra: cTLM struktúra számozás, nikkell leválasztás előtt**

Palládiumnál és nikkelnél a nyitófeszültség 2,2 V és 2,7 V körüli. A körök helyzetét a sor és oszlopszámuk határozza meg a fenti ábrán látható módon.

### 5.3. Tranzisztor mérés

A tranzisztor mérésnél megmértem a bemeneti és kimeneti karakterisztikákat. Először a kimeneti karakterisztikát mértem meg különböző tranzisztorokon. Ehhez különböző konstans kapufeszültségeken mértük meg a drain áramot a drain feszültség függvényében. Jelen esetben n-csatornás JFET-tel dolgozunk, amelynél fontos, hogy kapufeszültség negatív legyen mert, akkor záródik a tranzisztor. Ezt egy külön tápegység

biztosította, az árammérést és a drain-source feszültséget a Keithley biztosította. Ebben az esetben is a sweep módot használtam 0-1 V-os tartományban, 25 mA-es áramkorlátozással. Az első alkalommal csak 100 uA-ig mértünk, ilyenkor csak nagyon kicsi változásokat tapasztaltunk, majd utánanézttünk egy hasonló mérésnek [15], ahol jóval magasabb áramokkal mértek. Így kipróbáltuk magasabb áramokkal is, és ezzel sikerült elérni, hogy a csatorna ne vezessen. A képen az 1  $\mu\text{m}$ -os tranzisztorok közül az 2-es sorszámút mérem. A felső tű a gate, a bal alsó a drain, a jobb alsó a source.



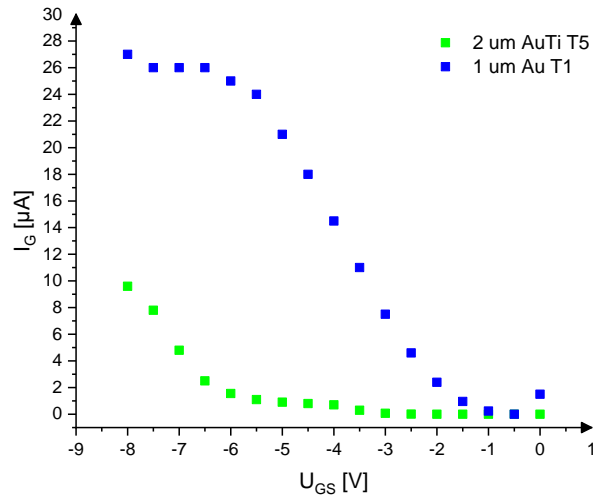
31. ábra: Tranzisztor mérése

### 5.3.1. Bemeneti karakterisztika

A cTLM mérésből kapott zárófeszültségből indultunk ki a bemeneti karakterisztikánál. A legkisebb kapufeszültséget -8 V-nak választottuk, és 0,5 V-os lépésközzel haladtunk felfelé. Sajnos ezt a mérést nem tudtuk automatizálni, mert ahhoz két Keithley-re lett volna szükség. Onnan látszik, hogy ezt a mérési elrendezést nem lehet automatizálni, hogy nem a gerjesztő feszültségen mérjük az áramot. A Keithley-vel adtuk ki az 1 V-os tápfeszültséget, árammérés közben,  $U_g$ -t manuálisan állítottuk. A tápegység feszültségét az összes mérésnél külön multiméterrel ellenőriztük.

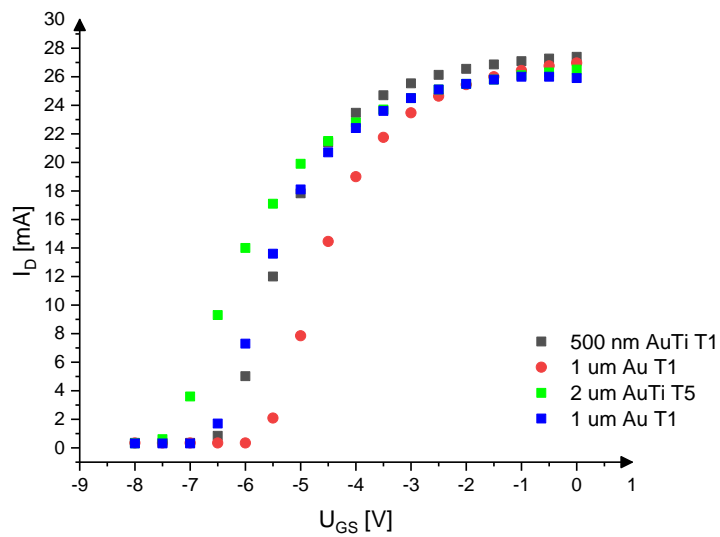
A tranzisztorok gate szélességétől függően vannak csoportba rendezve. Egy csoporton belül gate-source távolság nő 1  $\mu\text{m}$ -rel tranzisztorokként. A mérés során a gate kontaktpad-et egyszer kell beállítani csoportonként, utána a drain és source pad-ek között kell váltani. Elvileg nem kéne különbség legyen, ha felcseréljük a drain-t és a source-t, ezt is lemértük, mint később írom, tapasztaltunk eltérést. A bemeneti karakterisztika mérése során a gate áramot is lemértem. A tranzisztorok negatív gate feszültségnél zárnak, minél jobban zár a tranzisztor, annál nagyobb a gate áram. Ha kisebb ez áram,

akkor jobban tud erősíteni a tranzisztor. Ahogy az ábrán is látszik az Au/Ti rendelkezik a kisebb értékekkel. Ez zárt gate esetén is csak 10 uA, a 27 uA-es aránnyal szemben.



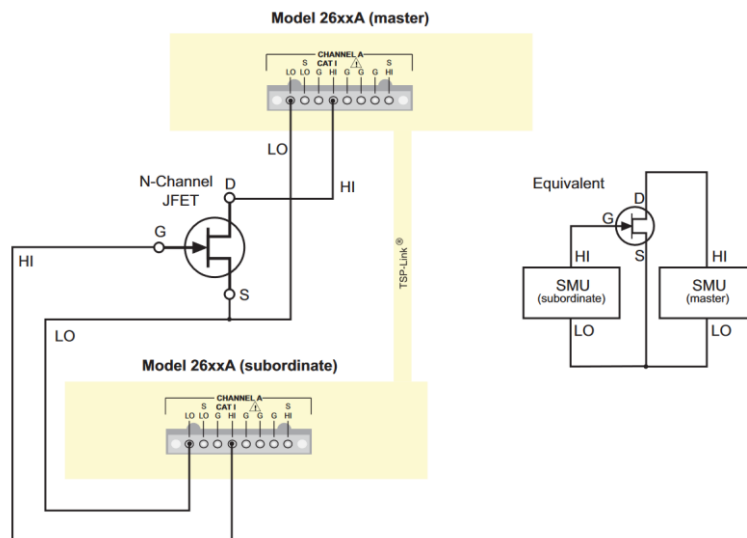
32. ábra: Gate áram a bemeneti karakterisztika mérésekor

Bemeneti karakterisztika szempontjából az látszik, hogy az Au/Ti gate hamarabb nyit. Ez kb. -7 V-os feszültségnél történik. Az elvárt négyzetes karakterisztikával szemben itt gyökös jellegű grafikonokat látunk. Ennek oka valószínűleg a nanoszerkezetben rejlik. Ebből a mérésből látszik, hogy ezen a 2D struktúrán át lehet hajtani 26 mA-t, ami a méretéhez képest jelentős.

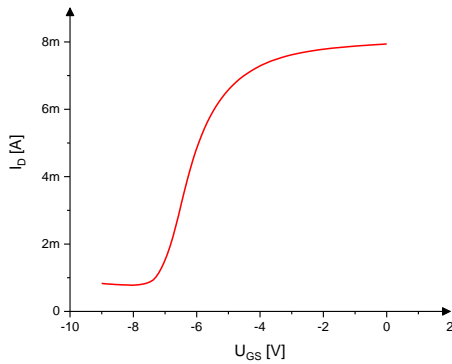


33. ábra: Bemeneti karakterisztika 1 V-os drain-source feszültség mellett; jelmagyarázat: gate szélessége, gate anyaga, tranzisztor száma

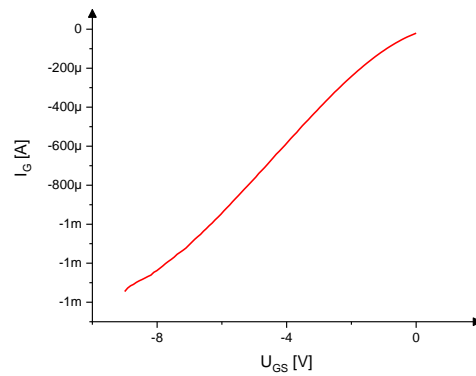
A palládium és nikkeles tranzisztorokat egy másik elrendezéssel mértem. Itt már volt kettő SMU, amelyekkel már lehetett automatizálni a bementi karakterisztikát is.



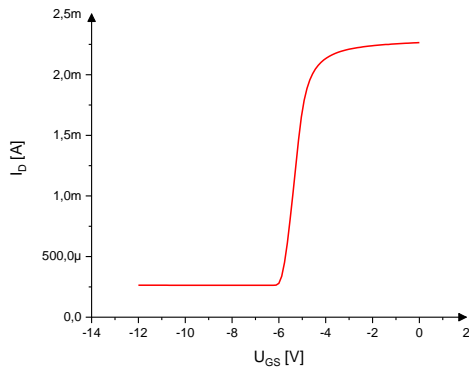
34. ábra: Két SMU csatlakoztatva egy háromlábú eszközhöz [25]



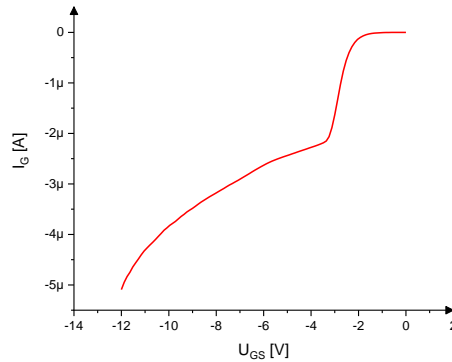
**35. ábra: Nikkel 3 um gate, T2-es tranzisztor bemeneti karakterisztikája**



**36. ábra: : Nikkel 3 um gate, T2-es tranzisztor gate árama eközben**



**37. ábra: : Nikkel 1 um gate, T2-es tranzisztor bemeneti karakterisztikája**

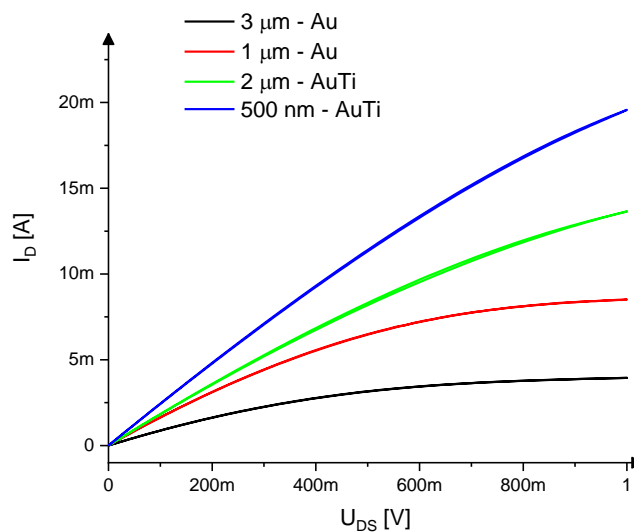


**38. ábra: : Nikkel 1 um gate, T2-es tranzisztor gate árama eközben**

Ezek a tranzisztorok valós körülmények között is működtek, ezért választottam őket a karakterisztikák bemutatására. A gate áram szivárgására ezt a két típust tapasztaltam. Vagy irreálisan nagy (több mint 1 mA, zárt állapotban), vagy reális értéket (pár  $\mu\text{A}$ ). A mérések során arra jutottam, hogy nem ez határozza meg, hogy az a tranzisztor működik-e. A bemeneti karakterisztika tekintetében a 3  $\mu\text{m}$  gate-tel rendelkező tranzisztornak szélesebb sávban lehet beállítani munkapontot, viszont ez kisebb változásokra kevésbé reagál, mint az 1  $\mu\text{m}$  gate-tel rendelkező FET, amelyiken látszik, hogy a -6 V-os nyitófeszültségtől erősen megnő a meredeksége. Ezt a precíz változást kihasználhatjuk az alacsonyteljesítményű szenzoroknál.

### 5.3.2. Kimeneti karakterisztika

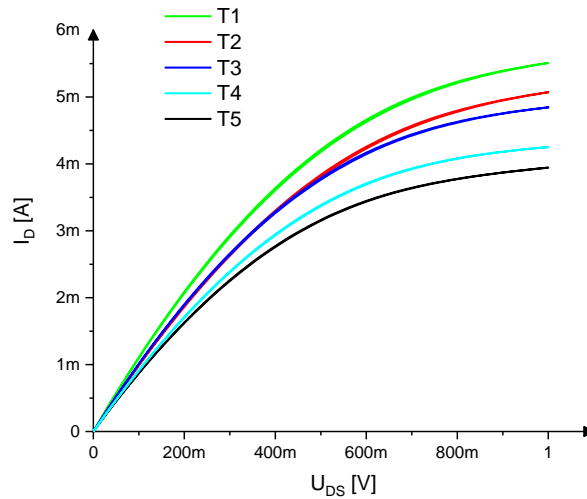
A kimeneti karakterisztikára is kaptunk értékelhető eredményeket. Az Au/Ti fémzésű gate tranzisztorok közül az 1 és 3  $\mu\text{m}$  széles gate-esek sajnos nem mutattak tranzisztorra jellemző paramétereket, mert valószínűleg rövidzárások lettek. Ezeket nem veszem figyelembe. A 20-as ábráról is leolvasható, hogy az Au gate-tel rendelkezők kisebb feszültségnél zárnak, és az is, hogy a gate szélességétől is függ a nyitófeszültség.



39. ábra: Kimeneti karakterisztika -5 V-os gate-source feszültségnél

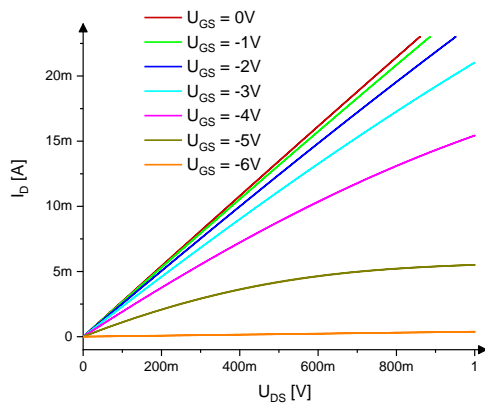
A következő ábrán azonos gate szélességű, fémzésű tranzisztorok működését rajzoltam ki, -5 V-os gate feszültség mellett. A nagyjából hasonló görbék között a csatornák hosszúsága teremt különbséget. Minél hosszabb, annál kisebb áram folyik a rajta.



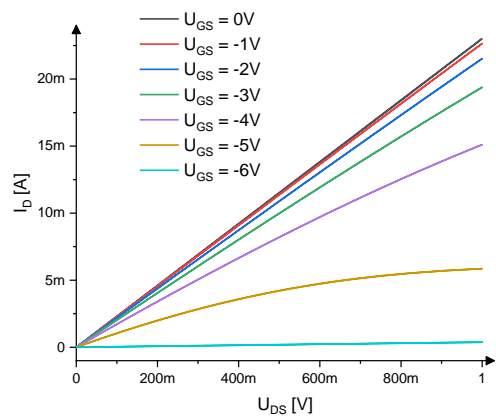


**40. ábra: Kimeneti karakterisztika arany, 3 μm-es szélességű gate-nél -5 V-nál**

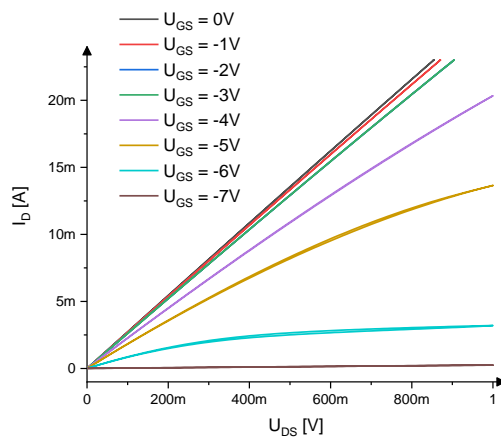
Az eddigieken kívül fontosnak tartottam készíteni néhány tipikus kimeneti karakterisztikát is, ahol egy tranzisztort vizsgálok különböző gate feszültségeken. Minél kisebb ez a feszültség, annál jobban zár az eszköz. Hasonló ábra az utolsó kettő ebben a fejezetben. Az elsőnél kipróbáltam, hogy mi történik, ha megcserélem a source-t meg a drain-t. Elvileg nem kéne semmi különbségnek lennie, mert egy FET, de a mi mintákon nagyobb az  $I_D$  áram az eredeti esetben, mint a megfordítva, különösen kisebb kapufeszültségnél. Az utolsó ábrán arany-titán gate fémmezéssel látható ugyanez.



41. ábra: Kimeneti karakterisztika arany, 3 μm-es szélességű gate T1-es tranzisztor

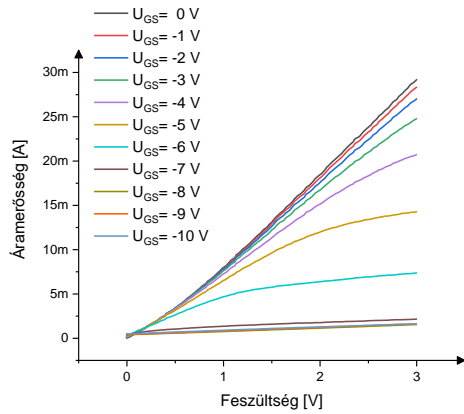


42. ábra: Kimeneti karakterisztika arany, 3 μm-es szélességű gate T1-es tranzisztor felcserélt drain-source-szal

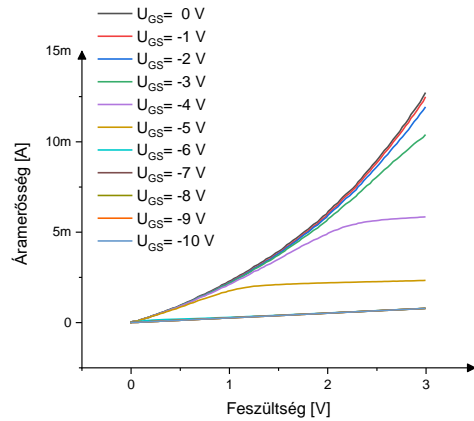


43. ábra: Kimeneti karakterisztika arany-titán, 2 μm-es szélességű gate T1-es tranzisztor

A másik mintát jelen esetben is a másik elrendezéssel mértem. Ismét ugyanazt a két tranzisztort választottam, ezekből készül az erősítő áramkör. Ebben az esetben a gate-source feszültségeket -10 V-ig mértem, mert eléggé változó volt a tranzisztorok nyitófeszültsége. Az 1 μm-esen nő a meredekség a feszültség növelésével, ez melegedés miatt nem lehet, mert attól csak csökkenne [4]. A 3 μm-esnél pedig a kiindulási pont nem azonos, ami viszont már lehet a hőmérséklet növekedés eredménye. Erőmérőműszeren csináltunk hőlégfúvós tesztet, és abból egyértelműen látszott, hogy ez a heterostruktúra mennyire erőteljesen reagál a hőváltozásra.



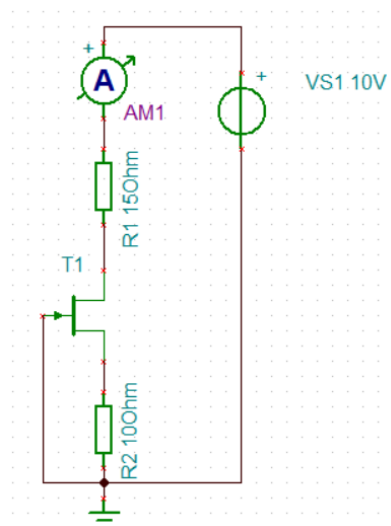
44. ábra: Nikkel, 3  $\mu\text{m}$ -es gate, T2-es tranzisztor kimeneti karakterisztikája



45. ábra: Nikkel, 1  $\mu\text{m}$ -es gate, T2-es tranzisztor kimeneti karakterisztikája

### 5.3.3. JFET alapú áramgenerátor létrehozása

Egy szenzornak általában egy kimenete, egy tápja és egy földje van. Ahhoz, hogy ezekből a tranzisztorokból erősítőt építsek legalább két feszültség/áramforrásra volt szükségem [26], később kifejtem miért. Szerencsére tranzisztorokkal ezt meg lehet valósítani, az egyik legegyszerűbb áramgenerátor mellett döntöttem. Egy áramgenerátortól azt várjuk el, hogy állandó áramot biztosítson bármilyen terhelés esetén, ennek megfelel ez az elrendezés.

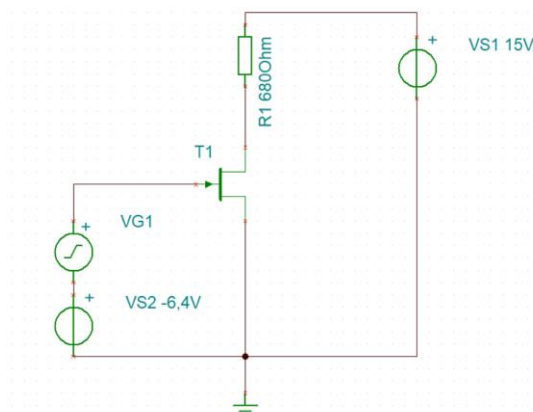


46. ábra: Áramgenerátor saját tranzisztorral

Ezt a kapcsolást megépítettem, az egyik saját tranzisztorral, és az árammérő által mutatott érték 67 mA volt.

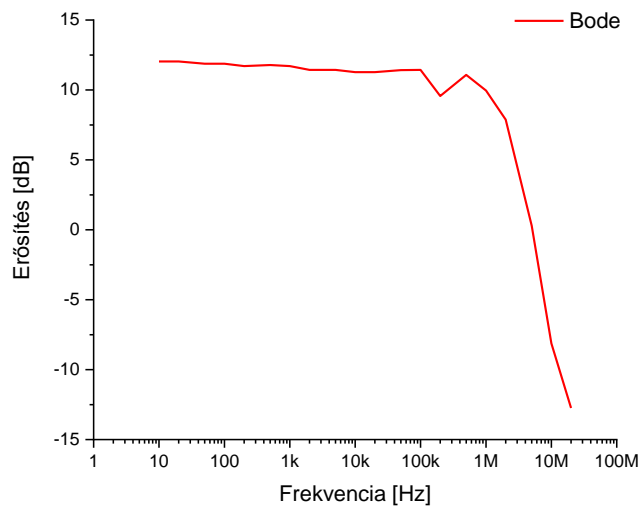
## 5.4. JFET alapú erősítő áramkör létrehozása

Léteznek olyan kapcsolások, amelyeknél elég egy tápfeszültség [26]. Ebben az esetben az gate-source előfeszítést egy feszültségosztóval oldják meg, de ahhoz, hogy ez sikerüljön a kiürítéses FET-eknél szükség van egy source ellenállásra, mellyel képesek vagyunk beállítani a source feszültségét magasabbra a gate feszültségénél. Ilyenkor kapunk csak negatív előfeszítést. Sajnos ezeknél a tranzisztoroknál, eddig ismeretlen oknál fogva, ha egy nagyobb ellenállást (100-1000+  $\Omega$ ) kapcsolunk a source-ra a váltóáramú kimenet 0 lesz, megszűnik az ellenállás. Ennél az oknál fogva szükséges a két tápos megoldás, ebből a legegyszerűbb, ha a függvénygenerátor ofszetjét használjuk DC munkapont beállításra, egyelőre.



47. ábra: Erősítő mérési elrendezése

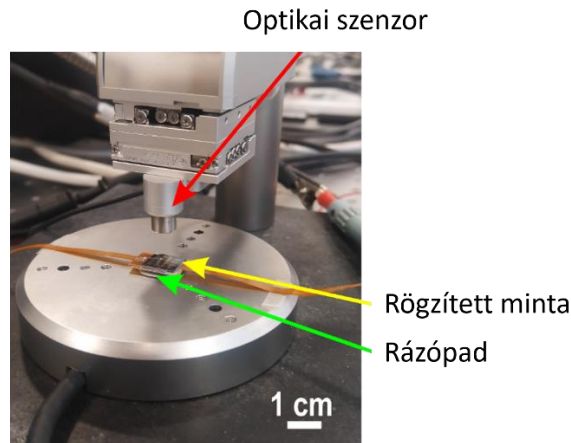
Ezzel az elrendezéssel és paraméterekkel 4-5-szörös erősítést sikerült elérnem a tranzisztorokon. A Bode-diagramon a töréspontja 1 MHz körül van, ami nem közelíti meg a több GHz-es működést [27], de a mi esetünkben ez is bőven elég, mivel a rezgőnyelv frekvenciája a száz kHz-es nagyságrendbe esik.



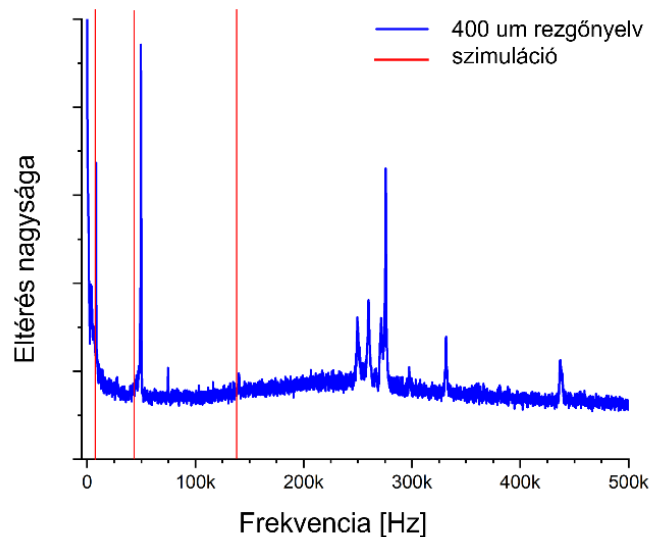
48. ábra: Saját JFET Bode-diagramja

## 5.5. Rezgőnyelv mérési eredménye

A rezgőnyelveket egy PicoScale márkájú vibrométerrel mértem meg. Ennek előnye, hogy optikailag állapítja meg a frekvenciát, így nem tesz kárt a mintában. Minden mérés előtt a rendszer Lissajous-görbék segítségével kalibrálja magát az adott mintához. A mérések során nehézséget okozott, hogy a mintát lehetőleg úgy rögzítsem, hogy hozzá kapcsolódó vezetékek minimálisan legyenek hatással a rezgés végeredményére. A rezgőpadhoz kétoldalú ragasztóval rögzítettem a mintát, a hajlékony hordozóját pedig az eszköz szélére ragasztottam ügyelve arra, hogy ne legyen benne feszültség. Ahhoz, hogy megtaláljam a szenzor sajátfrekvenciáját különböző frekvenciákon rezgettem, és megkerestem hol lehetnek a felharmonikusok.

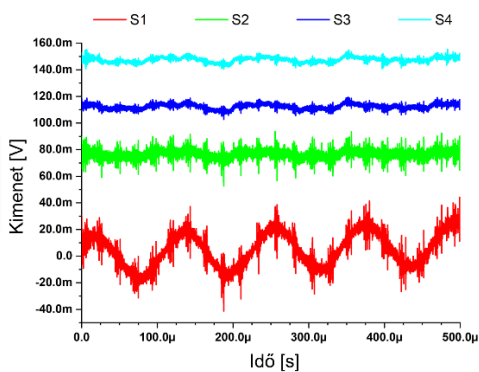


**49. ábra: Vibrométerrel való mérés**

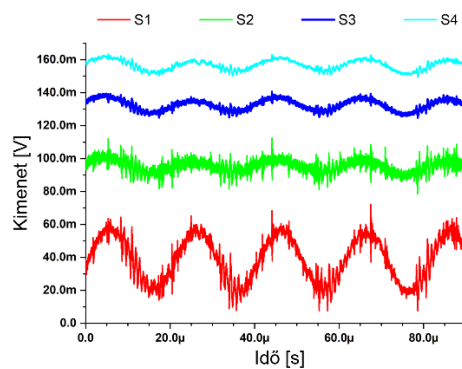


**50. ábra: Adott frekvenciákon való kitérése a 400 μm hosszú rezgőnyelvnek. Első felharmonikus 8,4 kHz; második felharmonikus 49,7 kHz; harmadik felharmonikus 127,6 kHz**

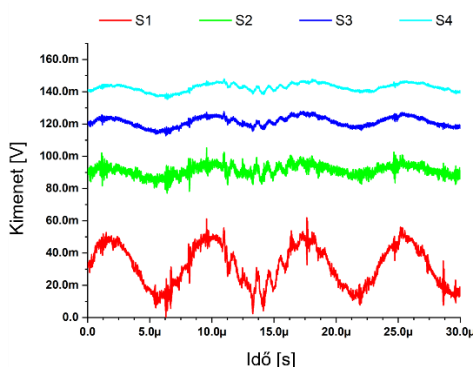
A kapott eredményeket összehasonlítva a mért értékekkel láthatjuk, hogy kicsit magasabbak, mint a szimulációé, de nagyjából megegyeznek. Következő mérésként a mintát ezeken a frekvenciákon rezgettem. Az elektromos méréshez használtam egy tápegységet, a földet a szélesebb vezetékre kötöttem az érzékelő nyelven, a tápot is a szélesebbre, csak éppen az érzékelő nyelvre. A meanderek másik felét egyesítettem, és kivezettem egy oszcilloszkópra.



**51. ábra: Kimeneti feszültség első harmonikus rezgetésnél**



**52. ábra: Kimeneti feszültség második harmonikus rezgetésnél**



**53. ábra: Kimeneti feszültség harmadik harmonikus rezgetésnél**

Az eredményből látszik, hogy a rezgést átvette a rendszer, általában az amplitúdó is kivehető. Az S1, S2, S3, S4 jelölések a négy darab meandert jelentik ebben a sorrendben a rezgőnyelv tővétől. Látható továbbá a tónél mindig nagyobb a feszültségváltozás, mint a többi esetben. Érdekes jelenség, hogy például a harmadik felharmonikusnál elméletben S2-nek és S4-nek ellenfázisban kéne lennie, de itt nem ezt tapasztaltam.

## 6. Összefoglalás és kitekintés

A dolgozatban bemutattam a vegyületfélvezetők szerepét és működését, nagy hangsúlyt helyezve az AlGaIn/GaN heterostruktúrára, amely anyag jelentős szerepet játszik az elkészített eszközökben. Szó volt az elméleti háttéréről, milyen módon változik az anyag vezetőképessége, ha mechanikus feszültséget hozunk benne létre. Továbbá a mérési módszerek háttéréről és a JFET-ről is esett szó. Leírtam azt, hogy hogyan készítettem el a mintákat, és milyen mérnöki megfontolásokat alkalmaztam közben, kezdve a végeselem szimuláció használatával. Bemutattam a mérések menetét és eredményeit, TLM, cTLM, kimeneti, bemeneti és egyéb karakterisztikák. Ezekből kiindulva létrehoztam egy erősítő áramkört, és egy áramgenerátort. Végül a rezgőnyelvek mérése történt, amelynek az eredményei erős alapot adnak további fejlesztésre.

Röviden a rezgőnyelveket és a tranzisztorokat is sikerült elkészíteni. Bár mindkét típusú eszköznek vannak hibái, a frekvenciaérzékelő rendszer fejlesztésében első lépésnek megfelel. A továbbiakban meg kell oldani, hogy a tranzisztor egy tápegységgel is képes legyen erősíteni. Ha ez sikerül, akkor rá lehet kötni az rezgőnyelv kimenetére, reméljük, hogy egy leválasztó kondenzátor elég lesz az illesztéshez. A rezgőnyelv csatornáinak az amplitúdóját növelni kellene a pontosabb értékek érdekében. Csökkenteni lehetne a meander hosszirányú kiterjedését, így pontosabb képet kaphatunk a 2DEG-ben bekövetkezett változásról, azon a helyen, ahová kiszámoltam a meander helyét.



## **7. Köszönetnyilvánítás**

Ez a dolgozat nem jöhetett volna létre az Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézete nélkül. Külön köszönet illeti Molnár Györgyöt, Nagy Attilát, Braun Ferencet, Bozorádi Jánost és Volk Jánost a segítségükért.

## Irodalomjegyzék

- [1] K. Shirabe *et al.*, “Efficiency comparison between Si-IGBT-based drive and GaN-based drive,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014, pp. 566–572. doi: 10.1109/TIA.2013.2290812.
- [2] M. Rais-Zadeh *et al.*, “Gallium nitride as an electromechanical material,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 23, no. 6, pp. 1252–1271, Dec. 2014, doi: 10.1109/JMEMS.2014.2352617.
- [3] T. Nanjo *et al.*, “First operation of AlGaN channel high electron mobility transistors,” *Applied Physics Express*, vol. 1, no. 1, Jan. 2008, doi: 10.1143/APEX.1.011101.
- [4] Hadis Morkoc, *Nitride Semiconductor Devices*. IEEE Press, 2013.
- [5] G. Patterson and J. Roberts, “Gallium Nitride - delivering its promise in Automotive Applications,” 2016.
- [6] O. Ambacher *et al.*, “Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaN/GaN heterostructures,” *J Appl Phys*, vol. 87, no. 1, pp. 334–344, Jan. 2000, doi: 10.1063/1.371866.
- [7] L. Diodes and S. Nakamura, “The Roles of Structural Imperfections in InGaN-Based Blue Light-Emitting Diodes and,” 1998.
- [8] C. A. Balanis, *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION*. [Online]. Available: [www.copyright.com](http://www.copyright.com).
- [9] M. Gad-el-Hak, *MEMS : applications*. CRC Press/Taylor & Francis, 2006.
- [10] American International University-Bangladesh. Faculty of Engineering, IEEE Computer Society. Bangladesh Chapter, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Bangladesh Section, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Design and Characterization of 2DEG Structure of a Gallium Nitride HEMT*.
- [11] A. Wang, L. Zeng, W. Wang, and F. Calle, “Modification of strain and 2DEG density induced by wafer bending of AlGaN/GaN heterostructure: Influence of

- edges caused by processing,” *AIP Adv*, vol. 8, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.1063/1.5020149.
- [12] M. Chu, A. D. Koehler, A. Gupta, T. Nishida, and S. E. Thompson, “Simulation of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high-electron-mobility transistor gauge factor based on two-dimensional electron gas density and electron mobility,” in *Journal of Applied Physics*, Nov. 2010. doi: 10.1063/1.3500465.
- [13] Tariq Abdul-Hameed Abbas and L. Slewa, “Transmission line method (TLM) measurement of (metal/ZnS) contact resistance.” Accessed: May 28, 2023. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/281346603\\_Transmission\\_line\\_method\\_TLM\\_measurement\\_of\\_metalZnS\\_contact\\_resistance](https://www.researchgate.net/publication/281346603_Transmission_line_method_TLM_measurement_of_metalZnS_contact_resistance)
- [14] P. Arivazhagan, S. S. Bhattacharya, and K. Baskar, “Circular Transmission Line Measurement (CTL<sub>M</sub>) Studies on Epitaxial Layers of AlGa<sub>N</sub>,” *Mater Today Proc*, vol. 5, pp. 10110–10117, 2018, Accessed: May 28, 2023. [Online]. Available: [www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings](http://www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings)
- [15] Z. Filep, “Kétdimenziós elektrongáz alapú elektromechanikus érzékelők TDK dolgozat,” 2020.
- [16] D. A. Neamen, *Semiconductor physics and devices : basic principles*. McGraw-Hill, 2012.
- [17] Gemma Rius Suné and Directed by Francesc Pérez-Murano and Joan Bausells, “Electron beam lithography for Nanofabrication,” 2008. Accessed: May 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3404/grs1de2.pdf;jsessionid=CF8C383C5668BF575B694F840EE818D6?sequence=1>
- [18] Henri Jansen†, Han Gardeniers, Meint de Boer, Miko Elwenspoek, and Jan Fluitman, “A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology,” 1996.
- [19] H. He Olscher, J. Falter, and A. Schirmeisen, “ATOMIC FORCE MICROSCOPY AND SPECTROSCOPY.”
- [20] “Plasma cleaning.” Accessed: Oct. 18, 2023. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_cleaning](https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_cleaning)

- [21] M. Hatzakis, B. J. Canavello, and J. M. Shaw, "Single-Step Optical Lift-Off Process," 1980.
- [22] "MMA / PMMA resists." Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.epfl.ch/research/facilities/cmi/equipment/ebeam-lithography/raith-ebpg5000/ebeam-resists-available-in-cmi/mma-pmma-resists/>
- [23] Y. Q. Fu *et al.*, "Deep reactive ion etching as a tool for nanostructure fabrication," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 27, no. 3, pp. 1520–1526, May 2009, doi: 10.1116/1.3065991.
- [24] A. A. Tseng, "Recent developments in micromilling using focused ion beam technology," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 4, Apr. 2004. doi: 10.1088/0960-1317/14/4/R01.
- [25] K. Instruments, "Series 2600A System SourceMeter Reference Manual," 2008. [Online]. Available: <http://www.keithley.com/company/termsandconditions>
- [26] Adel S. Sedra (Author), Kenneth C. (KC) Smith, Tony Chan Carusone, and Vincent Gaudet, *Microelectronic Circuits*. 2019.
- [27] K. Husna Hamza and D. Nirmal, "A review of GaN HEMT broadband power amplifiers," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 116. Elsevier GmbH, Mar. 01, 2020. doi: 10.1016/j.aeue.2019.153040.