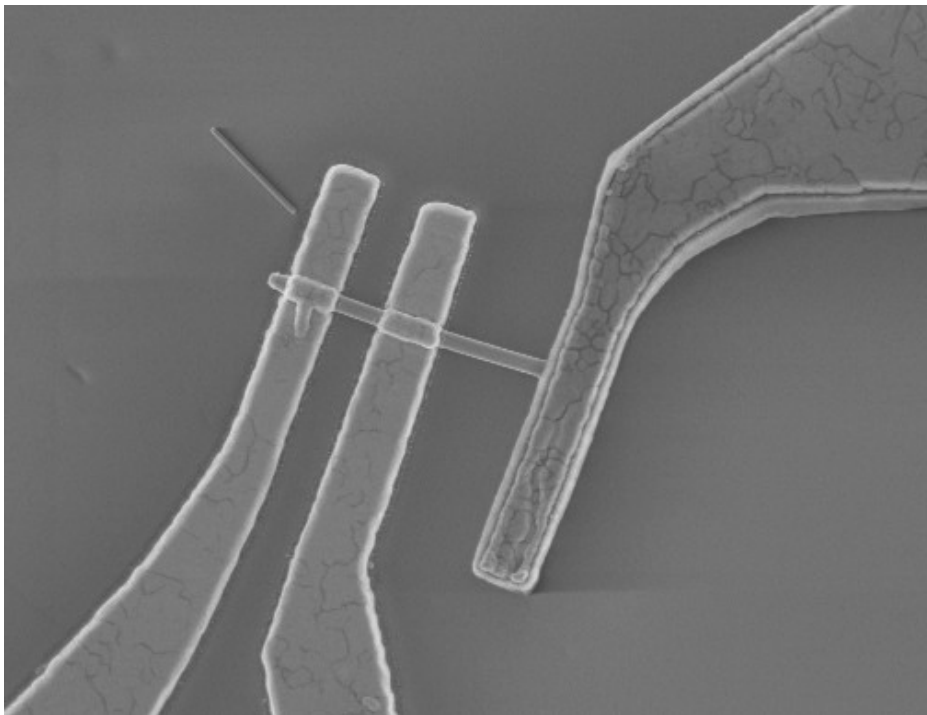


Tdk dolgozat

InSb nanoszál alapú tranzisztorok készítése és karakterizációja

Fülöp Bálint



Témavezető: Dr. Renaud Leturcq
Chargé de Recherche CNRS
Institut d'Electronique de
Microelectronique et de Nanotechnologie

Konzulens: Dr. Csonka Szabolcs
Egyetemi adjunktus
BME Fizika Intézet
Fizika Tanszék

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani első sorban Renaud Leturcqnek, aki lehetőséget biztosított arra, hogy a gyakornoki munkát nála végezhessem el, és mindeközben szakmai útmutatással, autonómia biztosításával és tanácsaival támogatott. Szeretném megköszönni Csonka Szabolcsnak a Tdk dolgozat írásában nyújtott segítségéért, mely nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre. Köszönettel tartozom ezen túl az IEMN személyzete számos tagjának, akik a munkám során segítséggel és tanáccsal láttak el.

Önállósági nyilatkozat

Alulírott Fülöp Bálint deklarálom, hogy a jelen dolgozatban foglaltak a saját gyakornoki munkám eredményei. Amennyiben mások munkáját felhasználtam, azt mindig forrás megjelölésével tettem.

A dolgozat a 2012 nyári gyakornoki munkám eredményeire épül. a BSc szakdolgozatom témájával 0% átfedésben van.

Budapest, 2012 okt. 30.

Fülöp Bálint

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás.....	2
Önállósági nyilatkozat.....	2
Célkitűzés.....	6
Elméleti és kísérleti háttér.....	9
Mérések és kiértékelés.....	16
Összefoglalás.....	29

Célkitűzés

Jelen TDK dolgozat indium antimonid alapú nanoszálak és a rá épülő tranzisztorok vizsgálatával foglalkozik. A tanulmány kiterjed a vizsgált minták előállítására éppúgy, mint azok karakterizációjára is.

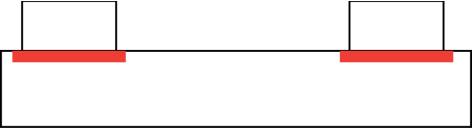
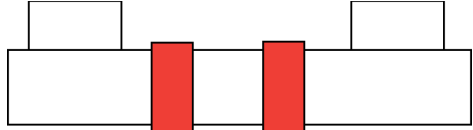

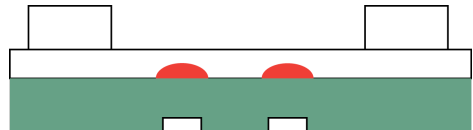
A dolgozat egy három és fél hónapos gyakornoki munka eredményeit dolgozza fel, amelyet a franciaországi Lille városában, az Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) fizikai kutatócsoportjában végeztem el Renaud Leturcq vezetésével 2012 májusa és augusztusa között.

A félvezető nanopálcák vizsgálata a nanoelektronika egyik legintenzívebben kutatott területének számít. Az indium-antimonid (InSb) nanopálcák a III-V félvezető nanostruktúrák egyik új tagja, amit csak az elmúlt években sikerült előállítani. Míg InAs alapú nanoszálak növesztése manapság már napi rutin, InSb alapú nanoszálak csak nehezen, meglehetősen kötött módszerrel állíthatók elő. Nehéz megmunkálása ellenére újabban azonban egyre inkább a figyelem középpontjába kerül, mert számos tulajdonsága igen kedvező, ami sokoldalú felhasználásra teszi alkalmassá:

- Kivételesen keskeny, mintegy 170meV szélességű tiltott sávja van, ami alkalmassá teszi arra, hogy a kémiai potenciál mind az elektron- mind a lyuksávba hangolható a kapu elektródával.
- A lyukvezetés nagy előnye, hogy a hiperfinom tér gyengébb a lyuk állapotokra, így hosszabb koherencia idő várható a megszokottnál.
- A spin-pálya kölcsönhatás a III-V félvezetők között ebben a legerősebb. Ennek következménye, hogy az elektron g-faktora a legnagyobb ebben a csoportban, nagyjából 50 körüli, ami által kis mágneses térben is különösen nagy Zeeman felhasadást érhetünk el.
- Az elektronok mobilitása szintén ebben az anyagban a legnagyobb, így azt várjuk, hogy a belőle készített eszközökben az elektronok sebessége a legnagyobb lesz az egyéb III-V félvezetőket használó tranzisztoroknál. Emiatt nagyfrekvenciás eszközök (pl. THz-es detektor) egyik kiváló lehetséges alapanyagaként tartják számon az InSb-t.
- A szilíciummal szemben direkt gapje van, így optoelektronikai felhasználása ígéretesnek látszik.

Kvantumelektronikai alkalmazása is sokoldalú lehetőségeket tartogat. Alap kutatás szempontjából fontos, hogy a régóta keresett Majorana-fermionok¹ létére utaló jelenségeket sikerült kimutatni szupravezetőhöz kapcsolt InSb nanoszálakban. Végül, de nem utolsó sorban ez az egyik legígéretesebb anyag félvezető nanoszál alapú kvantum bit létrehozására², mert az erős spin-orbit csatolás miatt a elektronok spinje hatékonyan hangolható külső elektromos tér segítségével. Ebben a dolgozatban a nanoszál alapú kvantum pöttyökről (quantum dot) lesz szó.

A félvezető nanoszál alapú kvantum pöttyök megvalósításának egyik szükséges feltétele a kvantum pötty szigetektől elválasztó potenciálgát megléte. Ezt több módon is megvalósíthatjuk:

- A fém-félvezető heteroátmeneten természetes módon kialakuló Schottky-gátak segítségével a szál egésze töltheti be a kvantum pötty középső szigetének feladatát. Ekkor tehát a pötty mérete lényegében a kontaktusok távolságával egyezik meg, míg az alagútáramot a Schottky-gátak határozzák meg. A módszer hátránya, hogy ez utóbbi azonban nem változtatható és nem kontrollálható. Ilyen megvalósításban az engem fogadó kutatócsoportnak (és más csoportoknak is) már sikerült működő kvantum pöttyöket készíteniük.³

- Tengely menti heterostruktúras nanoszálak heteroátmenete is biztosíthatja a kívánt potenciálgátat⁴. Ebben az esetben a szál növesztésekor a heterostruktúrák távolsága határozza meg a pötty méretét, az ilyen szakaszok hosszával pedig kontrollálni tudjuk a potenciálgátak szélességét.

- Lokális kémiai maratás a nanoszál morfológiájának a megváltoztatásával alakít ki gátakat. Ebben a lépésben kontrollálható a gátak nagysága és azok távolsága is.⁵

- Egy másik módszer szerint közvetlenül a szál alá vagy ráhelyezünk vékony, lokális kapu elektródákat³. Ezen kapu elektródákra feszültséget kapcsolva az elektródák alatti elektrosztatikus tér kiüriti a nanoszál ezen szakaszát. Az így kialakított kiüritett szakasz alkotja a kvantum pötty elválasztó gátjait. A gátak távolsága ezen gate-ek elhelyezésekor kerül rögzítésre, a gátak nagysága viszont használat közben a rákapcsolt feszültséggel állítható.


Látható, hogy a legutolsó megoldás egy lényeges szempontból többet nyújt a többinél: a potenciálgátat hangolva az adott kvantum pötty viselkedése folytonosan változtatható, ezért a csoportban – bár a felsorolt módszereket vizsgálták korábban – újabban ez utóbbi irányban folynak a vizsgálatok. Az is nyilvánvaló, hogy ezt a módszert követve lényegesen összetettebb a minta készítése, de újabban ez már nem jelent kivitelezhetetlen kihívást.

Egy fontos megállapítás ugyanakkor, hogy az első kivételével az összes felsorolt módszer esetében, így az alkalmazni kívántban is a fém-félvezető kontaktusnál lévő Schottky-gát nem játszik szerepet a kvantum pötty kialakításában. A gát azonban az összes esetben jelen van. Ez azt eredményezi, hogy az általunk kialakított gát és a Schottky-gát között szintén ki tud alakulni egy kvantum pötty, ami további, nem kívánt kvantum pöttyök megjelenéséhez vezet a vizsgált mintában, amit el akarunk kerülni.

Ebből az okból adódóan a jelenlegi stratégiai cél egyszeres, lokális gate-ek által kontrollált kvantum pöttyök létrehozása InSb nanoszálakon. Ehhez azonban le kell küzdeni a Schottky-gátak jelentette akadályt, amit az InSb nanoszál ohmikus kontaktálásával érhetünk el.

A gyakornoki munka feladata volt tehát InSb nanoszálakon ohmikus fém-félvezető heteroátmenet kialakítása: ehhez megfelelő fémet kell találni és megfelelő technika, technológia szükséges. Mivel az InSb alapú nanoszálak előállítását egy friss kutatási eredmény, és csupán néhány kutatócsoport képes jelenleg előállítani, ilyen vizsgálat még nem áll rendelkezésre a

szakirodalomban. Ezen dolgozatban négy különböző fémét vizsgáltam: Ti, Ni, Pd, Pt. Transzport mérések segítségével karakterizáltam a szál és a kontaktus vezetését, valamint field effect méréssel (a kapu elektróda hatásának vizsgálatával) vizsgáltam az elektron mobilitást a szálban. Ezek után három mintán elvégeztem egy gyors hőkezelési eljárást (rapid thermal annealing, RTA), és megnéztem ennek hatását a nanoszálakra és a kontaktusokra.

Az önálló kutatómunka magában foglalta a teljes fejlesztési ciklust:

- az irodalom feldolgozását és a tanulmányozni kívánt fémek kiválasztását,
- a minták elkészítését a nanoszálak szubsztráton való elhelyezésétől kezdve a kontaktusok kialakításán át egészen a hőkezelésig,
- az elkészített minták elektromos karakterizációját,
- a mérések kiértékelését.

A dolgozat fő eredménye, hogy sikerült megfelelő kontaktálási eljárást kidolgozni, amivel az igen jónak mondható 100Ω nagyságrendű kontaktus ellenállást sikerült elérni.

Elméleti és kísérleti háttér

Ebben a fejezetben először röviden szót ejtünk a Schottky-gátról és annak kialakulásáról. Ezután az általam vizsgált InSb nanoszálak növesztését ismertetem. Ezek után röviden ismertetem, milyen anyagokat választottunk a kontaktusok kialakítására, és milyen okokból, majd az alkalmazott hőkezelési eljárás részleteiről szólok. Ezután az általam vizsgált minták előállításának a folyamatáról lesz szó, amit a fejezet végén pedig az általam végzett mérések bemutatása követ.

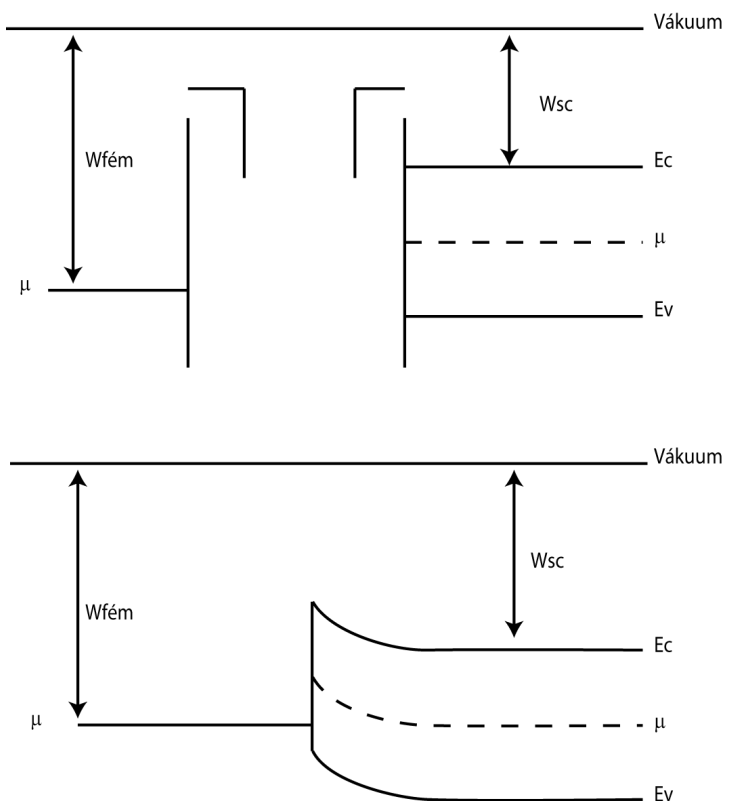
A Schottky-barrier

Egy makroszkopikus anyagban a kémiai potenciál távolsága a szabad állapottól az adott anyagra vonatkozó kilépési munka. Ez az adott anyag tömbi formájára, ideális körülmények között (felületi szennyeződésektől mentesen) érvényes. Egy fém és egy félvezető sávjainak egymáshoz viszonyított helyzete az adott anyagpárra jellemző, és direkt módon nincs összefüggésben a kilépési munkával.

Ezen anyagok összeérintésekor a töltéshordozók szabadon áramolhatnak egyik térfélről a másikra. Az átvándorló töltések egy elektromos potenciálkülönbséget okoznak, ami termikus egyensúlyban a kémiai potenciálok kiegyenlítésével jár. A határfelületen ugyanakkor a töltésárrnyékolás hatása nem érvényesül, ezért ott továbbra is az összeérintetlen eset energiaviszonyait figyelhetjük meg. Ha a fémet egy olyan félvezetővel érintjük össze, amelynek kémiai potenciálja az töltésátrendeződés előtt a sávok relatív helyzete szerint magasabb volt, mint a fémé, akkor a félvezető energianívói a felülettől távol a fémhez képest lefele mozdulnak el, kialakítva egy Schottky-gátat a felületen. Ez a gát egy kiürített réteget eredményez a félvezető oldalon, ami tehát akadályozza a töltésáramlást.

A gát magassága tehát alapvetően a sávok töltésátrendeződés előtti relatív helyzetétől függ. Ez utóbbi viszont adott félvezető esetén nem függ az alkalmazott fém választásától. Sőt, ennél többet is mondhatunk: a félvezető vezetési sávjának és a fém kémiai potenciáljának a távolsága, illetve a félvezető tiltott sávjának a szélessége azonos arányban állnak a legtöbb III-V félvezető esetén.⁶

A Schottky-gát ugyanakkor lecsökkenthető oly módon, hogy a kontaktusok környezetében lokálisan szennyezzük a félvezetőt.⁷ Ez történhet akár úgy is, hogy a kontaktált fémet használjuk a szennyezésre, és hőkezeléssel diffundáltjuk a félvezetőbe.



Ábra 1: A Schottky-gát kialakulása. A kontaktustól távol termikus egyensúlyban a kémiai potenciál kiegyenlítődik, míg a felületen a sávok felületi jelenségekhez kötött relatív helyzetét nem befolyásolja a töltésátrendeződés.

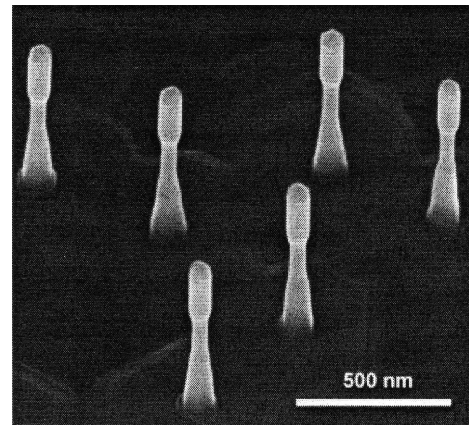
Az InSb pálca növesztése

InSb nanoszálak növesztése néhány éve lehetséges, az IEMN-ben ebbe az irányba csupán nem rég óta fordult a figyelem. Az alábbiakban ismertett eljárást használva növesztettek 2012 januárjában nagyobb mennyiségű intrinsic nanoszálakat, amelyet a későbbiekben kis adagokban használtunk fel⁸.

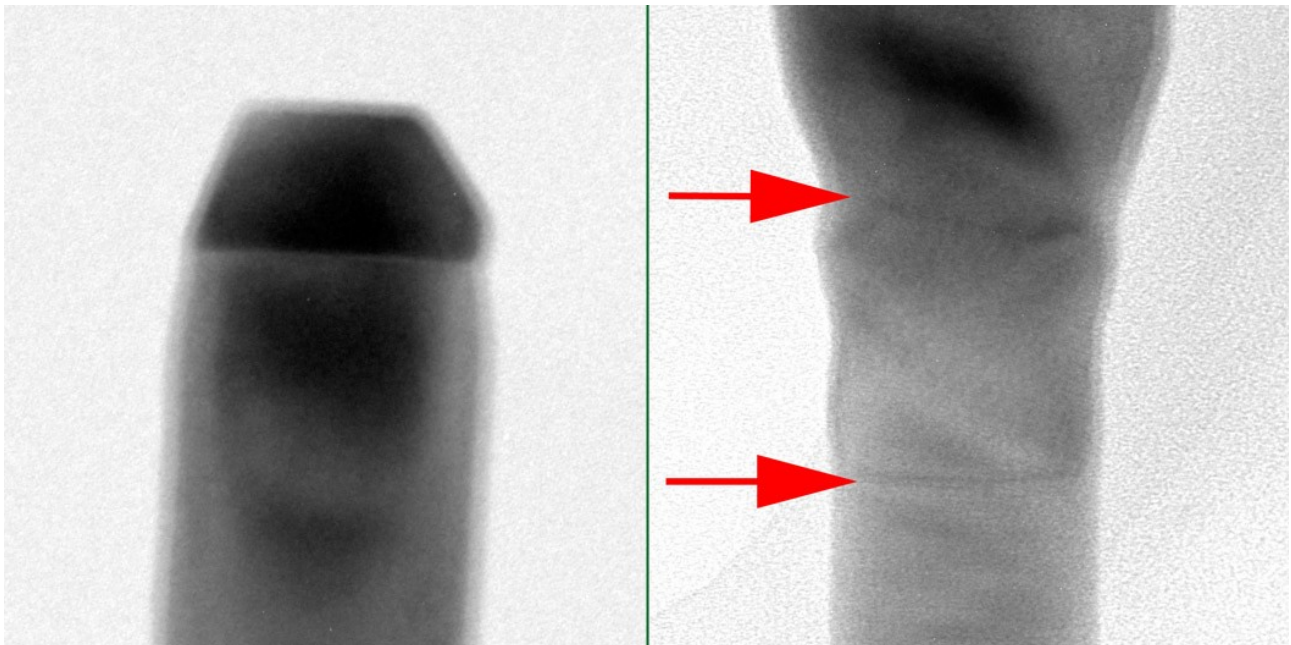
Az InSb nanoszálak növesztése igen körülményes módon tehető csak meg, bottom-up technikával, arany katalizátorral MOVPE eljárással. A nanoszálak egy InAs(111)B szubsztráton voltak növelve, amelyre arany aeroszol részecskék voltak szórva. Ezek után a szokványos eljárás szerint InAs nanoszál növesztése következett. Precursorként trimetil-indium (TMIn) és arzin (AsH_3) került felhasználásra. Ezután az InAs szálak tetején ülő arany katalizátor pöttyök segítségével InSb nanoszál növesztése folytatódott. Ehhez TMIn és trimetil-antimonid (TMSb) precursorokat alkalmaztak. Ezen fázis után visszatérve az InAs precursorokhoz a növekedés már nem folytatódott.

A növesztés 460°C -on, néhány percen keresztül történt mindkét fázis esetében. Ezek után SEM és TEM képeken elemezték a növesztett szálakat.

A 2. ábrán jól láthatóak a szubsztráton az InAs szálak egyre vékonyodó szálai, majd látható, hogy az InSb szál növesztésekor az átmérő megugrik. Ez annak köszönhető, hogy az In-Au-Sb hármas rendszer kialakulásakor a katalizátor gyöngy mérete megnőtt. Az InSb szálak tipikus



Ábra 2: Az InAs szálakra növesztett InSb szálak. Az InAs rész kúpos, alul 100nm, felül 40nm vastagsággal. Erre növesztették rá az InSb-t, ami az InAs-nél vastagabb volt.



Ábra 3: a) A két szálszakasz csatlakozásáról készült transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) kép. Halványan elkülöníthető három tartomány. Legalul az InAs a rá jellemző wurtzít kristályban látható. Az alsó nyíl magasságában a kristály méretskáláján hirtelen a kristályszerkezet az InSb-re jellemző cinkblende szerkezetté alakul. A felső nyíl magasságában pedig megkezdődött az InSb növesztése, a kémiai összetétel az előbbinél szélesebb átmenetben InSb-vé alakul. b) A szál végéről készült TEM képen látható az arany szem. A szem anyaga 28%Au, 68%In és 3.5% Sb

átmérője 50-100nm között változott, a hosszuk 1,7-2,2 μ m közé esett.

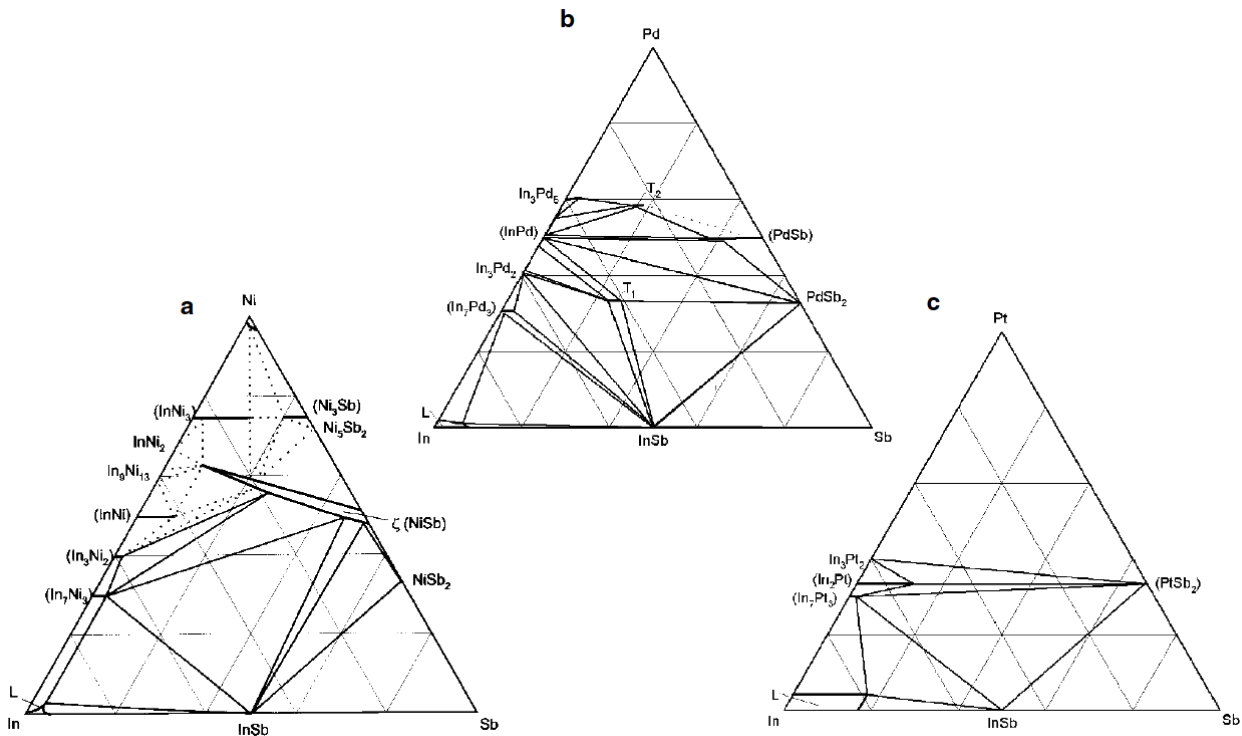
A szálak végén a növesztés végén ott maradt az arany szem, ami AuIn₂ ötvözetből áll. Mivel közöttük és a félvezető között a növesztésből fakadóan tökéletes felületi illeszkedés van, így ha létezik jó Au-InSb átmenet, akkor ez az lesz. Emiatt szintén egy lehetőségként felmerült, hogy ezt a szemét próbáljuk kontaktálni, hiszen a burkoló In réteghez ohmikus ellenállást készíteni nem nehéz. Azonban ez csupán csak az egyik végén alkalmazható a szálnak, és az Au-InSb felületen is felléphetnek felületi jelenségek. A szem kis mérete miatt az ilyen kontaktusok kialakítása nehézkes, és a mérések során nem találtunk érdemi eltérést a normális kontaktusoktól.

A vizsgálandó anyagok kiválasztása

Ahogy az korábban már említésre került, a fém-félvezető határfelületen az állapotok relatív energianívói kevéssé függenek az alkotó anyagoktól, fontosabbak a felületi jelenségek, így a tömbben mért kilépési munka nem ad érdemi információt a felületeken mutatott viselkedésre.

Először is érdemes tehát a jó felületi kontaktus kialakítását megcélozni. Ehhez az InAs-nél már bevált előállítási technológiát alkalmaztam, melynek kifejtésére ennek a fejezetnek a végén kerül sor. De ezen felül olyan anyagot kerestem, ami ötvözeite révén valamilyen módon reagálhat a nanoszál anyagával, esetleg diffúzióval belejutva adalékolásként viselkedhet a kontaktus közelében.

Az irodalomban már létezik In alapú ohmikus kontaktus⁹, azonban indiummal nem tudunk dolgozni a laborban. Nikkel⁸ és platina¹⁰ kontaktusok szintén alkalmasnak tűntek. In-Sb-X hármas rendszerek fázisviszonyait vizsgálva Ni, Pd, Pt kontaktusok kialakítása is számba jöhet¹¹.



Ábra 4: Ni, Pd és Pt fázisdiagramjai In és Sb jelenlétében. Az ábrák azt mutatják, hogy az egyes komponensek adott arányában milyen fázisok lesznek jelen. A kiírt vegyületek a stabil fázisokat jelzik. Az ezeket összekötő vonalakon a két végpontban lévő fázisok által alkotott kétfázisú állapotok találhatóak, míg az ezek által meghatározott sokszögekben három fázis van jelen.

Az ábrán látható, hogy Pd esetében két hármás fázist is találtak (T1 és T2), illetve a Ni esetében a ξ -vel jelölt tartományban ötvözetként van az In a NiSb-ban jelen. Ebben a fázisdiagramban ugyan nem találunk stabil platina hármás rendszert, de másoknak biztató eredményeket sikerült elérniük, ezért a Pt-t is bevettem a vizsgált fémek sorába.

A fenti megfontolások alapján a következő fémekre esett a választásunk: Pt, Pd, Ni. Az általunk tanulmányozott nanostruktúráknál általános a Ti kontaktusok használata, ezért referenciaként titánnal is készítettem kontaktusokat.

A hőkezelés meghatározása

A hőkezelés várt elsődleges hatása a felületi rácshibák kezelése valamint a kontaktusban használt fém diffúziója a szálban. Főként a kontaktusok környékén ez utóbbi adalékolást jelenthet a félvezetőben, ami megfelelő körülmények között a Schottky-barrier csökkentését idézheti elő. A diffúzió megléte és a kontaktusokra gyakorolt hatása azonban előre nem megjósolható.

Si és Be adalékolás sikeres termikus aktivációja is történt már 300-450 °C hőmérséklettartományban 20s-on keresztül folytatott ún. gyors hőkezeléses (rapid thermal annealing, RTA) módszerrel¹². Nem adalékolta InSb esetében a szálát 30s-ig önmagában hőkezelve egészen 400°C-ig nem kell aggódnunk a szerkezetváltozás miatt¹³. Az IEMN-ben készített nanoszálak növesztési hőmérséklete szintén 460°C. Ez alapján a hőkezelés hőmérsékletét 300°C-ban állapítottuk meg, idejét pedig 30s-ban.

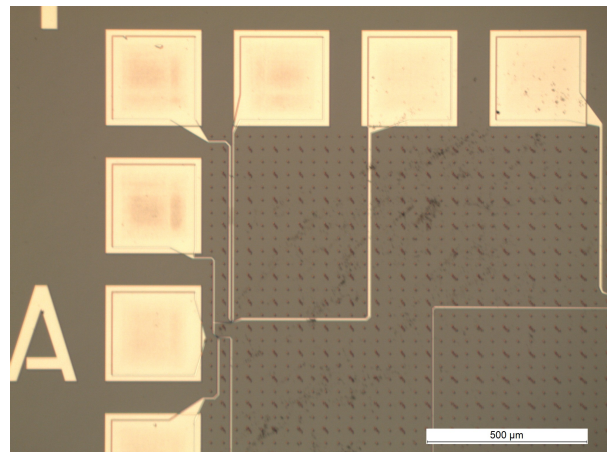
A hőkezelést egy erre a célra kialakított speciális sütőben hajtottam végre, ami alkalmas nagyon rövid, néhány tíz másodperces hőkezelés végrehajtására. Ennek bővebb leírása a következő részben történik.

Az áramkörök készítése

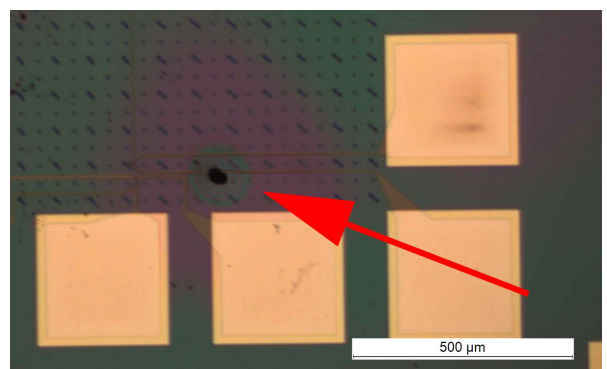
A mintákat már markerekkel ellátott szubsztrátra készítettem. A szubsztrát n+ dópolt szilícium lapka volt, amelyet hőkezeléssel mintegy 225nm vastagságban eloxidáltak. A szubsztrát a markereket egy nagyjából 4mm x 4mm-es mátrixon tartalmazta és körül 16db, egyenként 280 μ m élhosszú négyzetes kontaktusokat. Egyetlen mintán négy ilyen mező volt (A, B, C, D jelzéssel). Ezen réteghez a felhasznált fém arany volt.

A preparáció a következő lépéseket tartalmazta:

- A nanoszálak felvitele a szubsztrátra (terítés). A nanoszálakat ugyanarról a 2012 januári növesztésről egy szalvétával kézzel vittük fel a szubsztrátra. Mivel a szubsztráton való precíz pozicionálás nem volt követelmény, ezért nem volt szükséges mikromanipulátorokat használnom. Kis



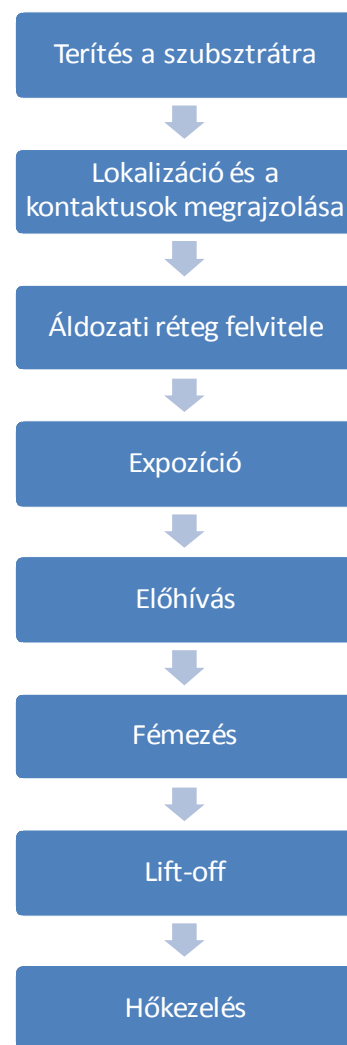
Ábra 5: Az egyik minta "A" mezőjének egy részlete. Láthatóak a négyzetes kontaktusok a nanoszálakhoz futó vezetékekkel, valamint a markerek hálózata



Ábra 6: Egy nagyobb szennyeződés körül az áldozati réteg vastagsága megnő, ami megnehezíti a megfelelő mintázatok kialakítását. A képen látható porszem a nanoszálaktól függetlenül került a mintára

gyakorlás után a szálakat megfelelően izoláltan sikerült felvinnem a szubsztrátra, ami elengedhetetlen a felhasználásukhoz. Két összetapadt szálát ugyanis sem szétválasztani nem lehet, sem pedig összetapadt formában felhasználni. Ezen felül az is fontos, hogy a másikkal nem összetapadt szál megfelelő távolságban legyen a szomszédjaitól, hogy a szál kontaktálásakor a szomszédok ne kerüljenek vele párhuzamos kapcsolatba. Harmadik feltétel, hogy a nagy, összetapadt gombolyagokat messze el kell kerülni, ugyanis ezek a nagyobb, szennyeződésnek tekintendő képződmények körül a folyadékáramlás módosulhat, ami a litográfia során hátrányos lehet: az áldozati réteg az átlagosnál vastagabb lehet körötte, a vegyszerek kevésbé férnek hozzá.

- Az elhelyezést optikai mikroszkópon ellenőriztem, hogy megbizonyosodjak arról, megfelelő számú, és megfelelően izolált szálát sikerült a szubsztrátra vinni. Ezek után pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) felvételeket készítettünk a szálakról. Keresni kellett az előző pontban említett követelményeknek megfelelően izolált szálakat. 5kV feszültséggel, 2 000x és 50 000x nagyításban készültek képek a kiválasztott szálakról. Előbbivel a markerekhez viszonyított relatív helyzet meghatározása volt a cél, utóbbival pedig a szál minőségét vizsgáltuk meg. Ez az roncsolhatja a szálakat, azonban enélkül nem tudjuk kialakítani az áramköri mintákat. Ebből az okból azonban a kontaktusok SEM-ben való ellenőrzésére csak a mérések után került sor.
- Ezek után a Layout Editor nevű, litográfiai minták tervezésére való programban a kontaktusok megrajzolására került sor. Ehhez a SEM képek alapján a kiválasztott szálak lokalizálása történt meg először, majd ezen szálak köré kontaktusokat terveztem oly módon, hogy a környezet esetleges zavaró hatásait kiküszöböljük. A kontaktusokhoz vezető vezetékek másik vége a mátrix szélén elhelyezett nagy arany négyzetek voltak, amelyekhez később bondolni lehetett volna, vagy – mint a jelen esetben végig – mikromainpulátorok karjait érinteni.
- A következő lépésben az áldozati réteget vittük fel a mintára. Az áldozati réteg két komponensből állt. Az első egy MAA copolimer réteg volt, 60nm vastagságban. Erre került 420nm vastag 495K lánchosszú polimetil-metakrilát (PMMA) réteg. A két réteg felvitele azonos technikával járt, amelyhez egy spinnert és egy kemencét használtam. A mintát a spinnerbe tettem, majd rácsöppenttem a megfelelő oldatot (a folyamatban PMMA 3%-os anizolis és MAA 13% etil-laktátos oldatot használtam), ezután egy előre programozott forgatással egyenletesen terítettem az oldatot a felületen, majd a kemencében 10+2 percen keresztül 180°C-os hőmérsékleten sütöttem.
- Ezek után került sor az expozícióra, amit az intézet arra kijelölt felelőse végzett el. Az elektron-litográfia 100kV névleges feszültségen, 25nm felbontással, 370 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ dózissal készült. A mintázatok legalább 300nm szélesek voltak. Ezt a használt csíkszélességet alapvetően a fémzés vastagsága határozta meg, ami a nanoszálak átmérőjétől függött, hiszen a kontaktusoknak rendszeren be kell azokat fedniük.



Ábra 7: A minta elkészítésének főbb lépései

- Az expozíció után a mintát elő kellett hívni. Ezt metil-izobutil-keton (MIBK) és izopropil-alkohol (IPA) 2:1-es keverékében tettük meg, amit IPA-ban történő lemosás kísért. Az előhívás ideje az eredeti recept szerint 60s volt, azonban Pt és Ti esetében második próbálkozásra felemeltük ezt az időt 75s-ra, ami javított a módszer hatékonyságán: ezek a fémek a rövidebb előhívás után kevésbé tapadtak a litografált részekre, ami esetenként kontaktusok elvesztésével járt. A megnyújtott előhívással a kontaktusok közül lényegesen több maradt ép a lift-off után.
- Az előhívást plazma kezelés követte, amely a reziszt maradék eltávolításához szükséges. Majd ezt ammónium-szulfidos passziváció követte, hogy megszabaduljunk a félvezető felületi oxidrétegtől, ami jelentősen ronthatja a kontaktusok ellenállását. Ez a lépés különbözik az amúgy bevett argongázos dezoxidálástól, és előnyének tekintik, hogy az argongázos bombázással ellentétben ez egyáltalán nem roncsolja a félvezető felületét. Ezek után került sor a fémrétegek felvitelére. Ez elektronsugaras fémleválasztás (EBPVD - electron beam physical vapor deposition) módszerrel történt. A kontaktusok két rétegből álltak: 20nm a vizsgált fémből, majd 150nm aranyréteg következett. Ez utóbbit szintén a gép megbízott kezelői végezték el.
- A fémezés után következett a lift-off, azaz a felesleges fém eltávolítása az áldozati réteggel együtt. Ezt 70°C-s SVC-14 oldószerben hajtottam végre, amelyben legalább fél óráig áztak a minták. Az idő leteltével az oldószer enyhe ráfújásával a felesleges fémréteg könnyedén lejött.
- A mintát ezek után a karakterizációs laborban megvizsgáltam, majd egy későbbi alkalomkor a három első körben készített mintán (Ti, Ni, Pd) hőkezelést hajtottam végre. Ezt egy halogénlámpával üzemelő RTA kemence (rapid thermal annealing – gyors hőkezelés) segítségével hajtottam végre. A hőmérsékletet 300°C-on tartottam 30s-on keresztül, továbbá a hőkezelés nitrogén közegben történt. A felmelegítés és a lehűtés során mintegy további 5-5s-on keresztül volt a hőmérséklet 250 °C fölött.

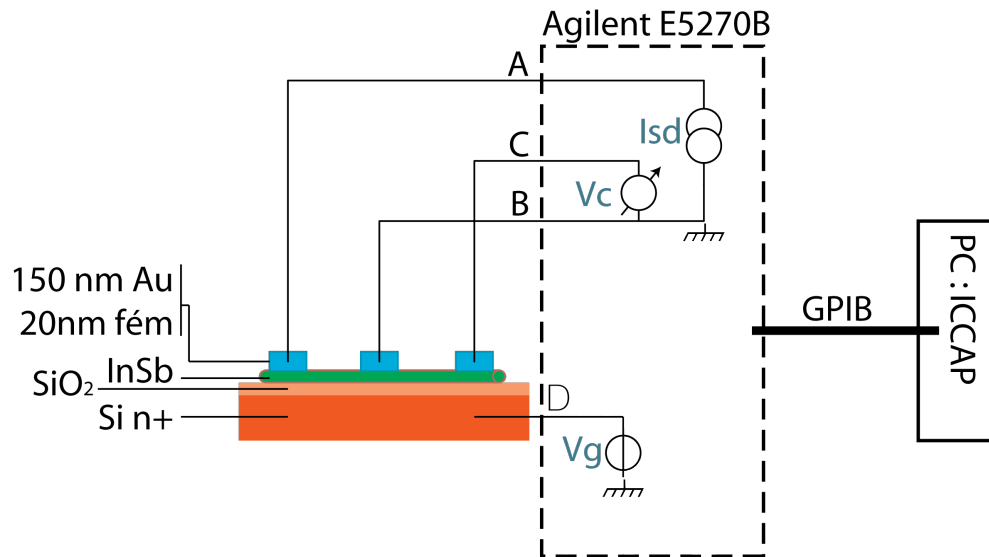
A transzport mérések

A transzport méréseket egy erre kialakított, mikromanipulátorokkal felszerelt mérőpadon folytattam. A minta egy fém kabinba volt zárva a mérés alatt, ami elektromágneses árnyékolást is biztosít (így lehetőséget adva nagyfrekvenciás mérésekre), folyékony nitrogénnel hűthető és vákuumot is elő lehet benne állítani. Én ez utóbbi funkciót használtam ki, mert a levegő, különösen a levegőben jelen lévő vízgőz a felületre abszorbeálva jelentősen megváltoztatja a szál vezetőképességét, mivel a töltéshordozók jórészt a felületen vezetnek.

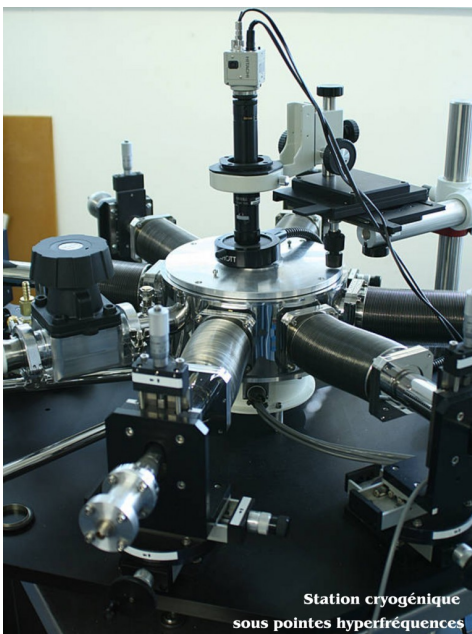
A mérések során a szálakat és a kontaktusokat az arany négyzetek segítségével azonosítottam: minden egyes mezőn ezek 1..16 között voltak számozva. A mikromanipulátorok karjait kézzel, finom menetemelkedésű csavarokkal lehetett vezérelni. Kontaktus létrehozásához az arany négyzetes kontaktusokhoz kellett érinteni a mikromanipulátorok karjain lévő tűket, amik a felületre nyomáskor kis mértékben rugalmasan deformálódtak. Ezt a deformációt videokamerával látni lehetett, ily módon szemrevételezéssel lehetett meggyőződni az érintkezésről.

A méréshez egy Agilent E5270B típusú mérőkeretbe épített SMU (source-measurement unit) egységeket használtam. Ezen egységek áram- vagy feszültséggenerátor üzemmódban tudnak üzemelni, eközben a kontaktuson átfolyó áramot, valamint annak a földpotenciálhoz képesti feszültségét is tudják mérni. Az eszköz GPIB porton keresztül számítógépről vezérelhető, amit a gyártó programjával tettünk meg (8. ábra).

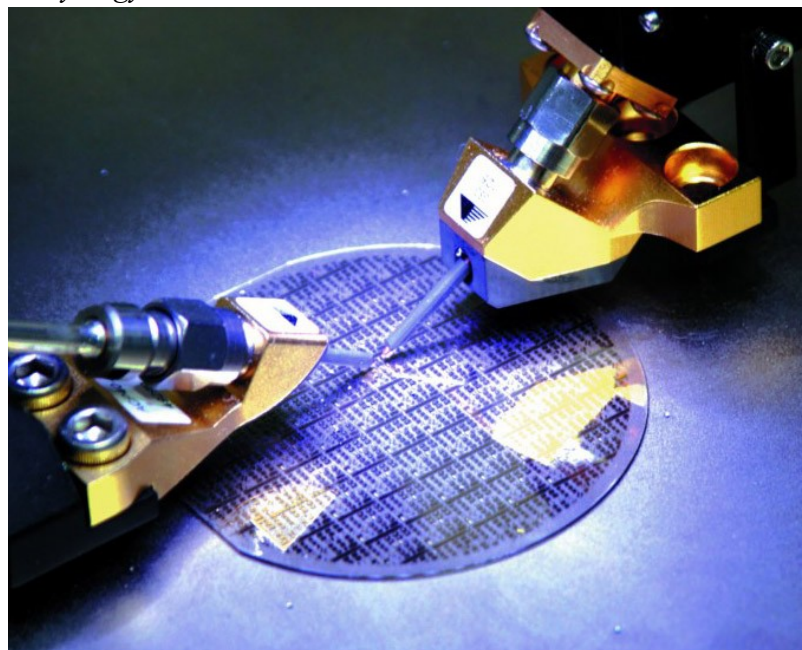
A manipulátor karjaira a mérések során egy E5281B közepes és egy E5280B nagy teljesítményű egységet csatlakoztattam, valamint egy földkivezetést használtam. A munka során három különböző típusú mérést végeztem a mintákon: a szál ellenállását egészében vizsgáló kétpont méréseket, majd a kontaktellenállást direkt módon meghatározni engedő hárompont méréseket, valamint ún. tervezérelt méréseket, amelyek segítségével a töltéshordozó-mobilitást mérhetjük meg a szálban. A mérések részletes leírását a harmadik fejezetben teszem meg.



Ábra 8: A mérési elrendezés. A mérőműszer GPIB porton kommunikált a számítógépen lévő, a gyártó által készített mérőprogrammal (IC CAP), ami irányította a méréseket. A manipulátor karjait ezután minden alkalommal kézzel kellett a megfelelő arany négyzetekhez érinteni.



Ábra 9: A használt mérőeszköz. A minta vákuumban vagy levegőn, elektromágnesesen leárnyékolva, szobahőmérsékleten volt tartva a középső edényben (forrás: www.iemn.univ-lille1.fr)



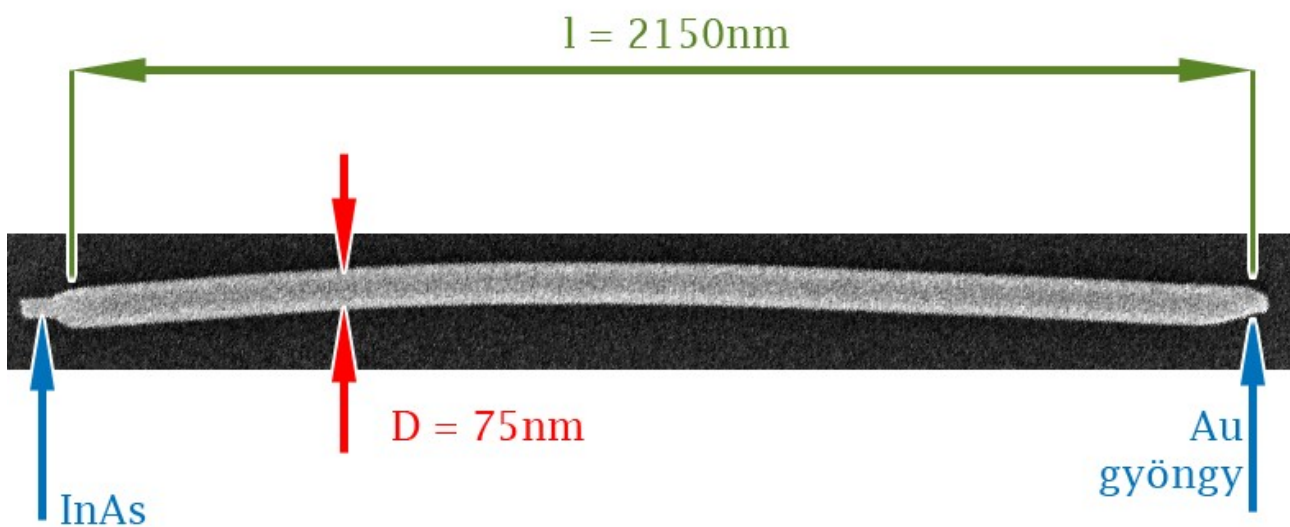
Ábra 10: A mikromanipulátorok tűvel érintkeztek a minta mérőpontjaihoz. (Ez az ábra egy másik, de hasonló műszert mutat, mivel az általam használt a védőtök miatt nem látható ilyen jól.) A nanoszál csatlakozásait az előre elkészített arany négyzetekhez kötöttem, majd a mérés során ezekhez érintettem a manipulátor karjait. (forrás: www.iemn.univ-lille1.fr)

Mérések és kiértékelés

Ebben a fejezetben először megvizsgáljuk a szubsztrátra szórt nanoszálak külsejét, majd részletezzük, milyen típusú méréseket végeztem a karakterizáció során: szót ejtünk a két- és hárompont-mérések elvéről, kivitelezéséről és eredményeiről, majd pedig a tervezérelt méréseket mutatom be. Ezek után figyelmünket a szál vezetési tulajdonságaira fordítjuk, és végül a különböző fémek által létrehozott kontaktusokról szólnak.

InSb nanoszálak és kontaktálásaik

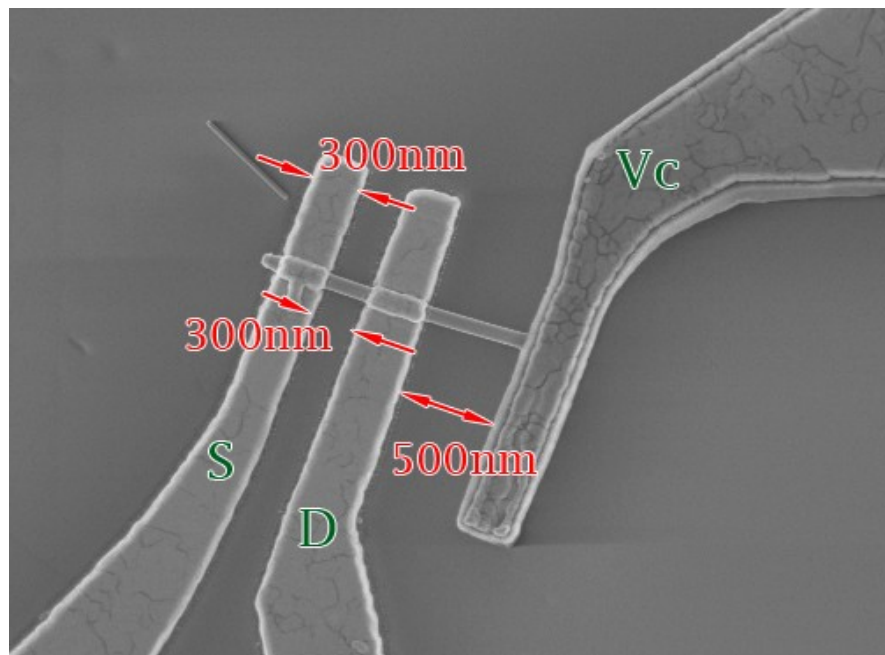
Az alábbi ábrán látható egy tipikus nanoszál elektronmikroszkópos képe. A szálon jól látható bal oldalt az InAs csomk, aminek a tetejére nőtt az InSb szakasz. A túlvégen látható az arany gyöngy katalizátor. Az ábrán látható szál kis mértékben meghajlott, ami gyakori jelenség volt, mértéke az ábrán láthatót általában nem haladta meg.



Ábra 11: Egy tipikus mért nanoszál SEM képe

Az InSb nanoszálon végezni kívánt méréseinkhez később részletezett okból fontos, hogy minél több kontaktust kössünk ugyanahhoz a szálnak. Egyetlen kontaktus szélessége 300nm volt, a kontaktusok távolsága 300 és 500nm között változott. A kontaktusok távolságának megválasztásakor azt tartottam szem előtt, hogy ne legyenek túl közel egymáshoz, mert akkor a hatásuk már nem tekinthető függetlennek egymástól, amit el akartunk kerülni. Ugyanakkor több, különböző hosszúságú szakaszt is ki akartam alakítani, a méréseket ezzel is sokoldalúbbá téve. Így a kontaktusok távolsága $3-500\text{nm}$ között változott. A szál kb. $2\mu\text{m}$ -es hossza ezek alapján maximum négy kontaktust engedett meg. A nanoszálak többségéhez valóban sikerült is négy kontaktust kapcsolni, azonban néha célszerűbb volt csökkenteni a kontaktusok számát, mint ahogy az például a 12. ábrán is látható.

Összesen öt mintán végeztem méréseket, minden mintán a lehetséges négy mezőből kettőt használtam fel, kettőt pedig a későbbi vizsgálatok érdekében szabadon hagytam. Egy-egy mezőn 16



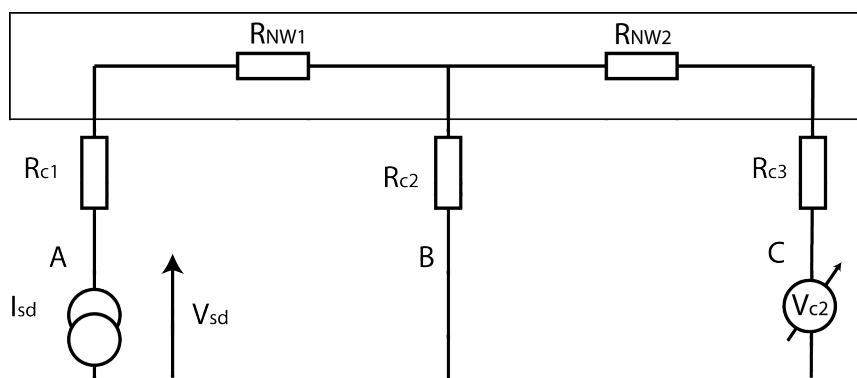
Ábra 12: A kontaktusok a nanoszálon. Ez a szál olyan rövid volt, hogy csupán három kontaktus fért rá, de így volt mód vizsgálni különböző hosszú szakaszokat. Az ábrán jelölve van egy tipikus hárompont-mérés elrendezése. S: source, D : drain, föld, Vc: itt mérhetjük a kontaktuson lévő feszültséget (l. részletesen később)

arany négyzet kontaktus van, azonban az egyik szál utolsó kontaktusához tartozó négyzet a következő szál első kontaktusát is ellátta feszültséggel. Ez nem okozott a mérésben hibát, mert a legutolsó szál utolsó kontaktja nem volt az első szál első kontaktjához kötve, azaz a teljes mezőn nem záródott be a kapcsolás. Ily módon a 16 kontaktussal sikerült 5 nanoszálal kontaktálni, és mindegyikhez 4 kontaktus tartozott. Ez tehát összesen valamivel kevesebb mint $5 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 4 = 200$ kontaktust jelent, mert az áramkörök készítése során a kontaktusok és a szálak egy része megsérült, vagy maga a litográfia nem sikerült jól. Szálanként 6 kétpont-mérés és 2 hárompont-mérés volt lehetséges, amiket a mintán hőkezelés előtt és az után is elvégeztem, ezáltal nagy mennyiségű nyers adatra tettem szert.

Két- és hárompont-mérések

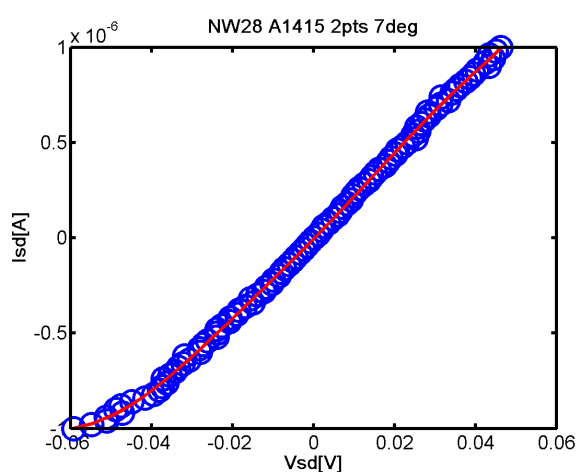
Kétpont mérés esetén a szál két kontaktusához csatlakoztattam a mérőműszer két kivezetését (a 8. ábra ill. a 13. ábra jelölése szerint az A és B csatlakozásokat), és a forrás és nyelő közötti áramot (I_{SD}) a $-1\mu A..1\mu A$ tartományon változtatva a kivezetéseken lévő forrás-nyelő feszültséget (V_{SD}) jegyeztem fel. Ennek értéke tipikusan 0.1V nagyságrendű volt, ami $10k\Omega$ nagyságrendű ellenállás értéket jelent. Ez tehát a 13. ábra jelölése szerint a következő összefüggésnek felel meg:

$$V_{SD} = I_{SD} \cdot (R_{C1} + R_{NW1} + R_{C2})$$



Ábra 13: Az elvégzett kétpont- és hárompont mérésekben a nanoszál áramköri helyettesítő képe. Kétpont-mérés esetén az A és a B csatlakozások működtek, míg hárompont-mérés esetén mindhárom csatlakozást bekötöttem.

A 14. ábrán látható egy tipikus kétpont-mérés eredménye. Ez jó közelítéssel lineáris függvény, ami tehát megegyezik az elvárásainkkal. Ugyanakkor nagy áramok esetén már tapasztalható némi nemlineáris viselkedés, azonban én csak a kis áramokra és feszültségekre vonatkozó lineáris tartományt vizsgáltam. Annak érdekében, hogy a nagyobb feszültségeknél jelentkező nemlineáris tag ne befolyásolja a függvényillesztésben a lineáris tartomány meredekségét, 2-, 4-, 7- és 9-edfokú polinomokkal illesztettem Matlabban, és a lineáris tagok együtthatóit vettem ellenállásértéknek. Az eltérő fokszámú polinomok különböző mértékben illesztettek sikeresen, de a cél a nagyfokú automatizálhatóság volt, hogy a nagy számú mérés adatait hatékonyan tudjam feldolgozni.



Ábra 14: Egy jellemző kétpont-mérés. Az x-tengelyen a feszültség, az y-tengelyen az I_{SD} áramerősség látható.

Ezért ezután a szórások inverzével súlyozottan vettem az ellenállásértékek számtani közepét. Ez a súlyozás igen hatékonyan bizonyult a rossz illesztésekből adódó hibák elnyomásáért.

Ezzel a módszerrel még nem tudjuk mérni közvetlenül a kontaktusok ellenállásait. Ez a mérés csupán arra volt jó, hogy lemérjem, mely kontaktusok működtek a minta előállítását követően. (A hőkezelést követően meg kellett ismételnem a mérést, mivel a kontaktusok egy jelentős része a hőkezelés hatására szakadt meg.)

A mérések során kiemelt célunk, hogy a kontaktus ellenállást a lehető legjobban mérni tudjunk. Ezért célszerű olyan mérési eljárást alkalmazni, ahol közvetlenül is mérni tudjuk a keresett ellenállásértéket. Mivel nem szükséges egy teljes szálszakasz ellenállásának pontos mérése, csupán a kontaktus ellenállást kell megmérnünk, célszerű hárompont méréseket alkalmazni.

Ekkor a kétpont-mérést annyiban módosítjuk, hogy a nyelőt előtt bekötünk egy feszültség mérőt is a 13. ábra elrendezése szerint a C ágba. Mivel ebben az ágban a feszültségmérő miatt nem folyik áram, R_{NW2} ellenállás feszültsége nulla, így a műszerről közvetlenül leolvasható R_{C2} kontaktus ellenálláson eső feszültség értéke. Mivel a szálon átfolyó áram ugyanebből az okból adódóan csak a B ágon folyik ki, $I_{SD} = I_B$, és a feszültségek aránya megadja a teljes ellenállás és

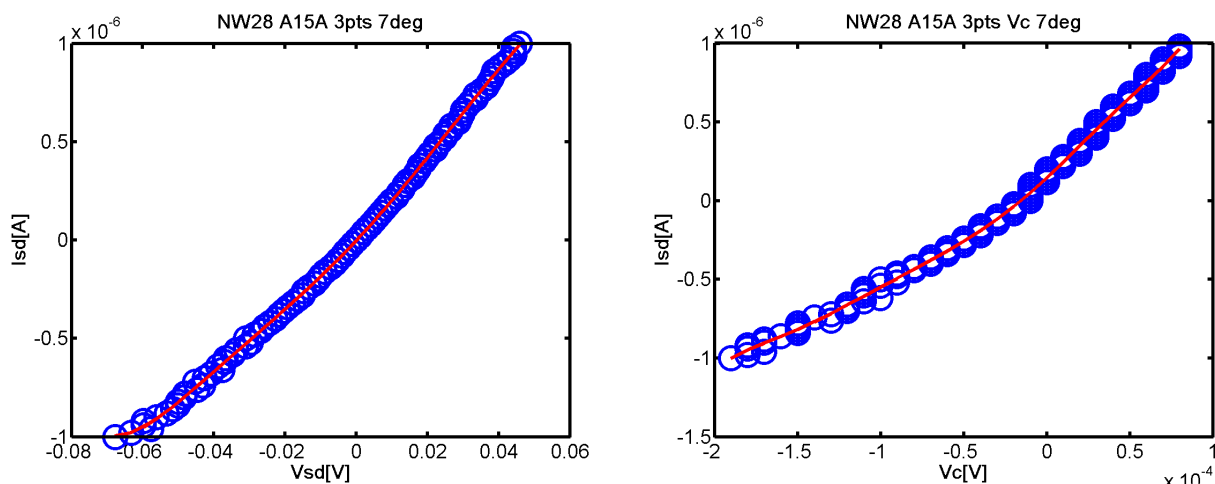
a kontaktus ellenállás értékének arányát:

$$R_c = \frac{U_c}{I_{SD}}$$

Egy tipikus hárompont-mérési eredmény látható a 15. ábrán. A jobb oldalon a forrás-nyelő feszültség függvényében látható a szálon átfolyó áram, míg jobbra a kontaktus feszültségének függvényében ábrázoltam ugyanezt. Látható az ábrán, hogy a kontaktus feszültsége két nagyságrenddel kisebb, mint a forrás-nyelő feszültség, ebből látható, hogy a kontakt ellenállás valóban töredéke csupán a nanoszál ellenállásának. A $V_c(I_{SD})$ görbe alakja gyakran nem mondott sokat, mert a műszer méréshatárával összemérhetően kis feszültségek voltak a kontaktusokon, így a görbék alakján néha nem is lehetett jól látni. A kontaktusok feszültségét csak az áram növelésével lehetett volna emelni, azonban ez a nanoszálak érzékenysége miatt túlságosan kockázatos lépés lett volna. Az így nyert görbékre viszont, igaz, kicsit nagyobb hibával, de lehetett a szokásos polinomokat illeszteni.

A mérési elrendezésből fakadóan nem tudjuk a szál két szélső kontaktusának ellenállását megmérni, így a mérésre alkalmas kontaktusok száma lényegesen kevesebb volt, mint a kétpont-mérésben vizsgált szakaszok száma.

A kontakt ellenállás kontaktáló anyagoktól való függését részletesen ezen fejezet végén vizsgálom meg.

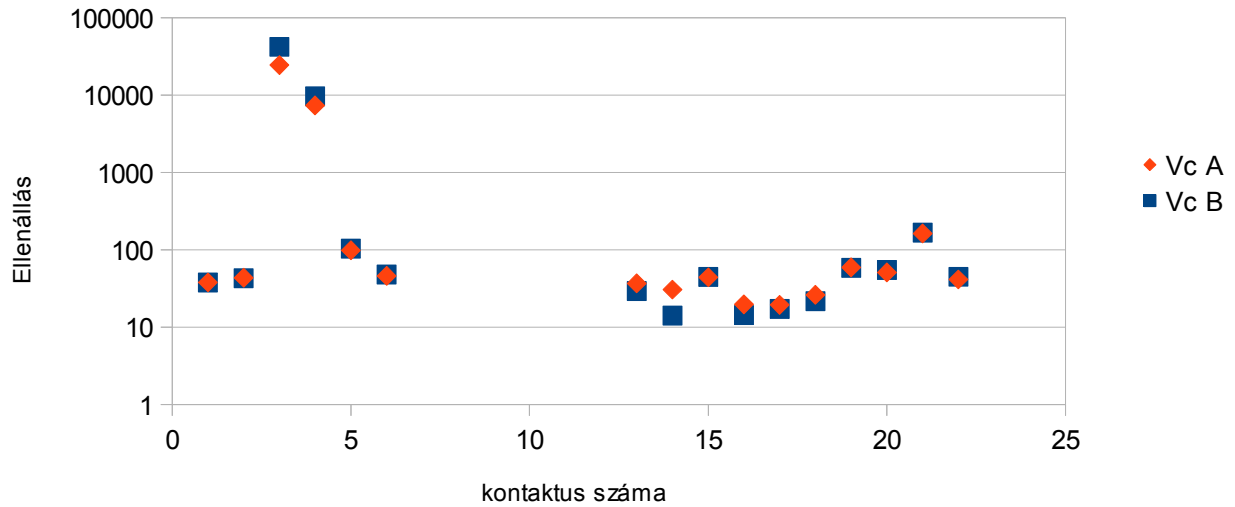


Ábra 15: Egy tipikus hárompont-mérés eredménye. A bal oldali ábra a forrás-nyelő feszültséget, a jobb a kontaktus feszültségét ábrázolja. Ez a minta egy 300nmhosszú szakasz és két Pd kontaktus együttese. Függőlegesen látható az áram, ami keresztülfolyt a szálon, vízszintesen a feszültség látható. Látható, hogy a jobb oldali ábrán azonos áram mellett a feszültség két nagyságrenddel kisebb, mint a bal oldalon.

A mérési elrendezésben a manipulátorok karjainak elmozdítása vagy az elektromos áramkör vezetőkeinek átkötése nélkül, csupán a szoftver eltérő vezérlésével kicserélhető az A és a C ág. Ezzel vizsgálni lehetett, hogy a kontakt feszültség függ-e attól, hogy melyik irányból folyik az áram a kontaktusba. Az elméleti megfontolásoknál említettük, hogy a kontakt ellenállás értéke a felületi jelenségektől függ, és amennyiben a nanoszál ellenállása nagyobb, mint a kontaktusé valamint a kontaktus túoldalán lévő fémé, az oldalfüggetlenség egyáltalán nem magától értetődő jelenség. Azonban a szisztematikus méréseket elvégezve megállapítható, hogy az ellenállások oldalfüggése nem volt számottevő. Ennek illusztrálására egy Pd mintán készített méréssorozat eredménye megtekinthető a 16. ábrán.

A középső ellenállások oldalfüggése

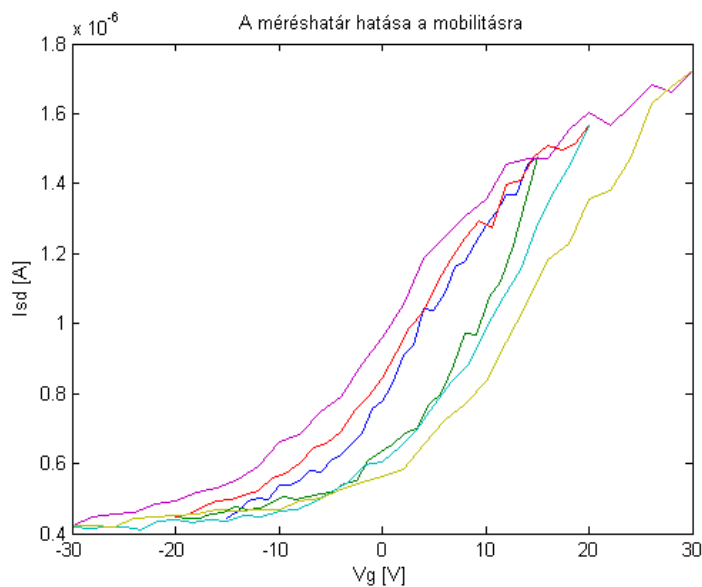
NW28 Pd/Au



Ábra 16: Kontaktus ellenállások oldalfüggése. Látható, hogy a kontaktusok ellenállás értékei lényegében nem függenek attól, az áram az "A" vagy a "B" oldalról (önkényes jelölés) folyik. Még a két, amúgy valamilyen okból hibás kontaktus esetében is a két ellenállás jó közelítéssel megegyezik.

Tervezérelt mérések

A tervezérelt mérések, vagy „field effect” mérések esetében a kétpont-méréseket annyiban módosítjuk, hogy a bias feszültséget egy kicsi és fix, $V_{SD}=10\text{ mV}$ értéken tartjuk, és a 8. ábra szerinti D csatlakozóra adott V_g kapu feszültség függvényében mérjük a szálon átfolyó áramot.



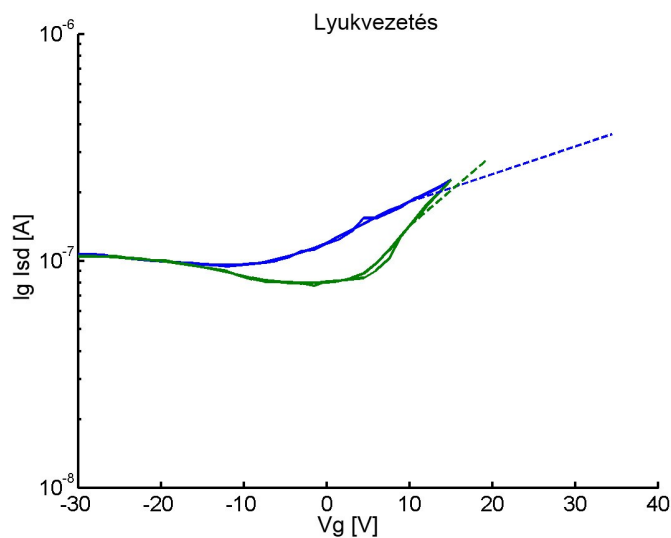
Ábra 17: Ez egy tipikus tervezérelt mérési eredmény. Vízszintes tengelyen a kapu feszültséget látjuk, míg függőleges tengelyen a szálon átfolyó áramot ábrázoltam.

A kapu feszültség hatására hangolni tudjuk a szálban az effektív kémiai potenciált, aminek következménye, hogy a szál vezetési állapotaiban változik a töltéshordozók száma. Ezért a várakozások szerint egy, a félvezető tiltott sávjának nagyságától függő küszöb feszültség átlépése után az átfolyó áram növekedni kezd.

A 17. ábrán látható egy tipikus tervezérelt mérési eredmény. Ez a mérés mutatja, hogy a kapu feszültséget növelve a szálban elektron vezetés történik. A grafikonon jól látható, hogy a kapu feszültség növelésére az áram nő, ami a szálban a vezetési elektronok számának növekedésével jár. Az ábrán kis mértékű hiszterézis is megfigyelhető, aminek egy lehetséges magyarázata a dielektrikumba csapdázódott töltések késleltető hatása (ne felejtsük, hogy a kapu elektródát és a szálat mintegy 225nm vastag SiO₂ réteg választotta el, ami – szigetelő révén – töltéseket tud csapdázni). Ezen az ábrán továbbá az is megfigyelhető, hogy a mérési tartomány megváltoztatása nem változtatja meg a görbe meredekségét.

Mivel az InSb gapje kicsi, így megvan az esélye, hogy a kémiai potenciálja a lyuksávba is hangolható. Azt várjuk, hogy a negatív irányban megjelenik egy másik, ehhez hasonló felfutás, ami a lyukak vezetésének felel meg. Azonban míg az elektronok mobilitása a tömbi InSb-ban $7.7 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, a lyukak mobilitása ettől jelentősen, mintegy két nagyságrenddel elmarad: $850 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. A két érték különbözősége abban nyilvánul meg, hogy a kapu feszültség negatív tartományában az áram növekedése jóval elmarad a pozitív oldalon tapasztalhatótól, azaz a negatív irányban a görbe sokkal lankásabb lesz.

A mérőeszköz méréshatára $\pm 30\text{V}$ volt, és -30V -os kapu feszültség értékig általában nem találtunk felfutást az áramban. A lyuktartomány vezetése némely, viszonylag ritka esetekben azonban mégis láthatóvá vált, erre egy példa a 18. ábrán látható mérés, Ni kontaktusokkal. Itt -10V kapu feszültség alatt logaritmikus skálán egy enyhe növekedést látunk az áramban, ami a lyukak koncentrációjának megnövekedésének és a lyukvezetésnek tulajdonítható.



Ábra 18: Egy látványos eset Ni kontaktusokkal, amikor a lyukvezetés hatása láthatóvá vált. (Az áram skálája logaritmikus.)

A görbe alapján az elektronok mobilitása kiszámolható a szálban: mobilitás a görbe meredekségével arányos. Ez a mérés tehát megmutatja, hogy a tömbi InSb-ban mérhető kivételesen nagy elektronmobilitás mennyire található meg a nanoszálban, illetve hogy a mintakészítés procedúrája milyen hatással van a mobilitásra.

A nanoszálban az elektronok mobilitásának kiszámolásához a következő képletet használtam¹⁴:

$$\mu = \frac{L_{NW}}{C_{ox} V_{SD}} \frac{dI_{SD}}{dV_{BG}},$$

ahol L_{NW} a vizsgált szakasz hossza, $V_{SD}=10\text{mV}$ az állandó értéken tartott bias feszültség, a derivált a fenti ábrákon a görbe meredeksége, C_{ox} pedig a nanoszál és a kapu elektróda közötti kapacitás értéke. Ez utóbbit egy síklap fölötti henger dielektrikumában vett kapacitásával közelíthetjük, ami a következő képlettel fejezhető ki:

$$C_{ox}^{\infty} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r L_{NW}}{\text{arcosh}(d/R_{NW})} \approx \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(2d/R_{NW})}$$

A szilícium-oxidon fekvő hengeres nanoszál esetében a dielektrikum azonban csak a szál alatt van jelen, ezért egy effektív $\epsilon_r=2,2$ közelítés ad jó eredményt¹⁴.

A tervezérelt mérések használatára az volt, hogy lássuk a nanoszálak viselkedését. A mérésekből következtetni tudunk ugyan a mobilitásra a fenti módszerrel, azonban az 3-4 nagyságrenddel elmarad az irodalmi értéktől. Ennek magyarázata további vizsgálatokra szorul. Részben adódhat a nanoszálban található kvantumozásból, aminek hatására a nanoszálban az elektron mobilitás lecsökken. Azonban azt meg kell jegyeznünk, hogy a mobilitásmérésnek vannak ennél pontosabb módszerei is, pl. a kvantum hall effektuson alapuló mobilitásbecslés. Különösen igaz lehet ez az InSb-ra, mert kis tiltott sávja miatt a vezetési elektronok számát sok minden egyéb tényező is befolyásolhatja, mint pl. a termikus gerjesztés.

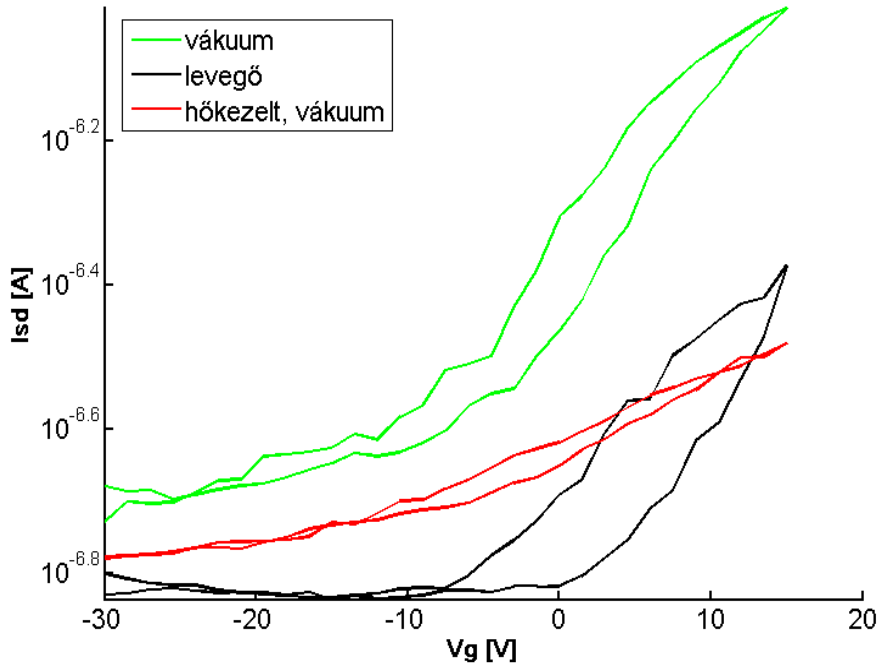
A szálban az áramvezetés többségében a felületen történik, így azt várjuk, hogy a levegő jelenléte a vezetést a vákuumban mért görbékhez képest lecsökkenti, mert a felületre adszorbálódott vízmolekulák egy árnyékoló hatást fejtenek ki a felületen.

A méréseket elvégeztem vákuumban, majd szabad levegőn is és a hőkezelés után is. A 19. ábrán látható az egyes esetek összevetése egy kiválasztott nanoszál egyik szakasza esetén. Láthatjuk, hogy a levegőn mért áramerősség értékek valóban elmaradnak a vákuumban mért értékektől.

A hőkezelés hatása szintén nagyon látványos ezen az ábrán: jól láthatóan sokkal laposabb a görbe. Ez egy fémes jellegű viselkedés, ugyanis a fémek esetében a kémiai potenciál értéke a sáv közepére esik, így annak hangolása egy kapu elektródával nem változtatja a töltéshordozók számát.

Tehát a hőkezelés hatására a szál fémesen kezdett viselkedni, aminek egy valószínű magyarázata, hogy a kontaktusban alkalmazott fémek bediffundáltak a nanoszál szerkezetébe. Ezt alátámasztja a fajlagos ellenállás mért értékeinek változása hőkezelés hatására, amit a következő részben taglalok.

A hőkezelés és a levegő hatása



Ábra 19: A levegő és a hőkezelés hatása a tervezérelt mérésekre. Látható, hogy levegő jelenlétében a szál vezetése mintegy 10-es faktort csökken, amit a felületre adszorbálódott vízmolekulákkal magyarázunk. A hőkezelt görbe sokkal lankásabb és a kiürülés sem történik meg olyan mértékben, mint a azelőtt. Ez fémes viselkedésre utal, amit azzal magyarázunk, hogy az ennél a kontaktusnál használt Ni atomjai részben vagy egészen bediffundáltak a nanoszálba.

A nanoszál vezetőképessége

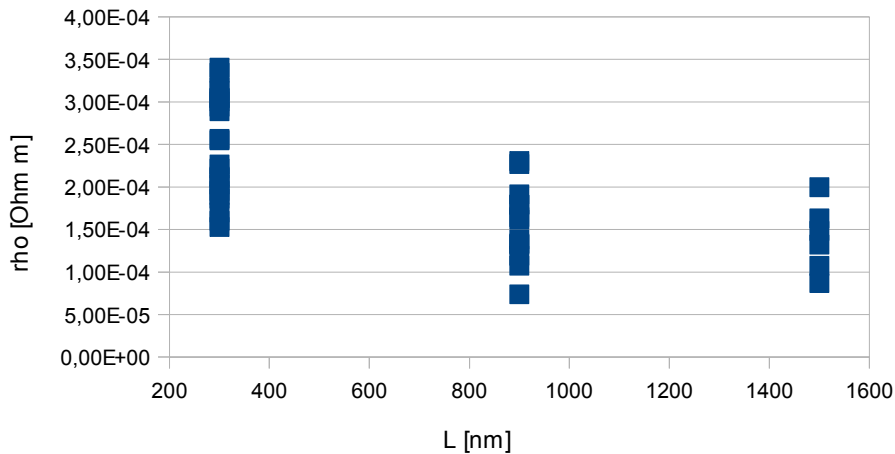
A nanoszál vizsgálatánál az egyik fontos kérdés, hogy a tömbi InSb-ban mérhető vezetőképességhez hogyan viszonyul a nanoszálban mért érték, illetve mennyire függ a vezetőképesség a szál geometriai paramétereitől: a hosszától és az átmérőjétől. Ennek meghatározása érdekében a fajlagos ellenállást kkiértékeltem a mért mintákban a szokásos képlettel :

$$\rho = R \frac{1}{L} \left(\frac{D}{2} \right)^2 \pi$$

A képletben R a nanoszál mért ellenállását jelöli, L a kontaktusok távolságát, D pedig a szál SEM képek alapján becsült átmérőjét jelenti.

A nanoszál anyaga homogén, így arra számítottunk, hogy a kontaktus ellenállások hatását leszámítva a fajlagos ellenállás nem fog változni egy vizsgált szál különböző szakaszai között, valamint a különböző szálak között sem. Ugyanakkor a szálak kis méretéből adódó kvantumos bezártság hatására nem zárható ki, hogy meglepő tulajdonságokat találunk. Az InSb tömbi fajlagos ellenállás értéke $\rho = 4 \cdot 10^{-5} \Omega m$, ehhez viszonyítom a mért értékeket.

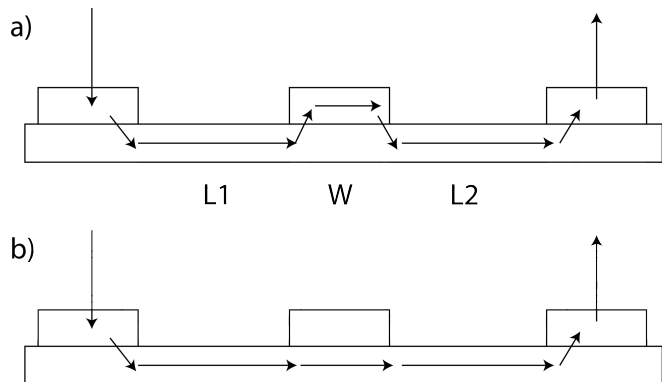
rho(L) NW27



Ábra 20: Látványos hosszfüggése van a vezetőképességnek. Ni/Au elektromos kontaktusok.

A 20. ábrán a fajlagos ellenállást ábrázoltam a kontaktusok távolságának függvényében. Ekkor érdekes viselkedés válik láthatóvá: a fajlagos ellenállás hosszabb szakaszokat nézve csökken. Az értéke jellemzően az $1 \cdot 10^{-4} \Omega m$ nagyságrendben marad, ami kétszerese az irodalmi értéknek tömbi InSb esetén. A jelenség magyarázata az áram terjedési mechanizmusában keresendő.

A kontaktusok közötti távolságok $W = 300..500nm$ között változtak, az ennél nagyobb távolságok esetén biztosan volt a két vizsgált kontaktus között egy harmadik is, ami megváltoztathatta az áram folyását. Ha ugyanis a kontaktus fajlagos ellenállása megfelelően kicsi és a nanoszál ellenállása (amit a tömbi InSb fajlagos ellenállásával közelítünk) lényegesen nagyobb a kontaktusban használt fém fajlagos ellenállásánál ($10^{-8} - 10^{-9} \Omega m$ a használt fémekre), az áram a kontaktus alatt nem folyik a félvezetőben, hanem kilép a fémbe, és ott folyik tovább, majd a másik végén lép vissza a nanoszálba. Ebben az esetben a 21. ábra b) részében jelölt áramút helyett az a) részében jelölt valósul meg, így a kontaktusok távolsága helyett (ami az ábra jelölése szerint $L_1 + W + L_2$) csupán $L_1 + L_2$ lesz.

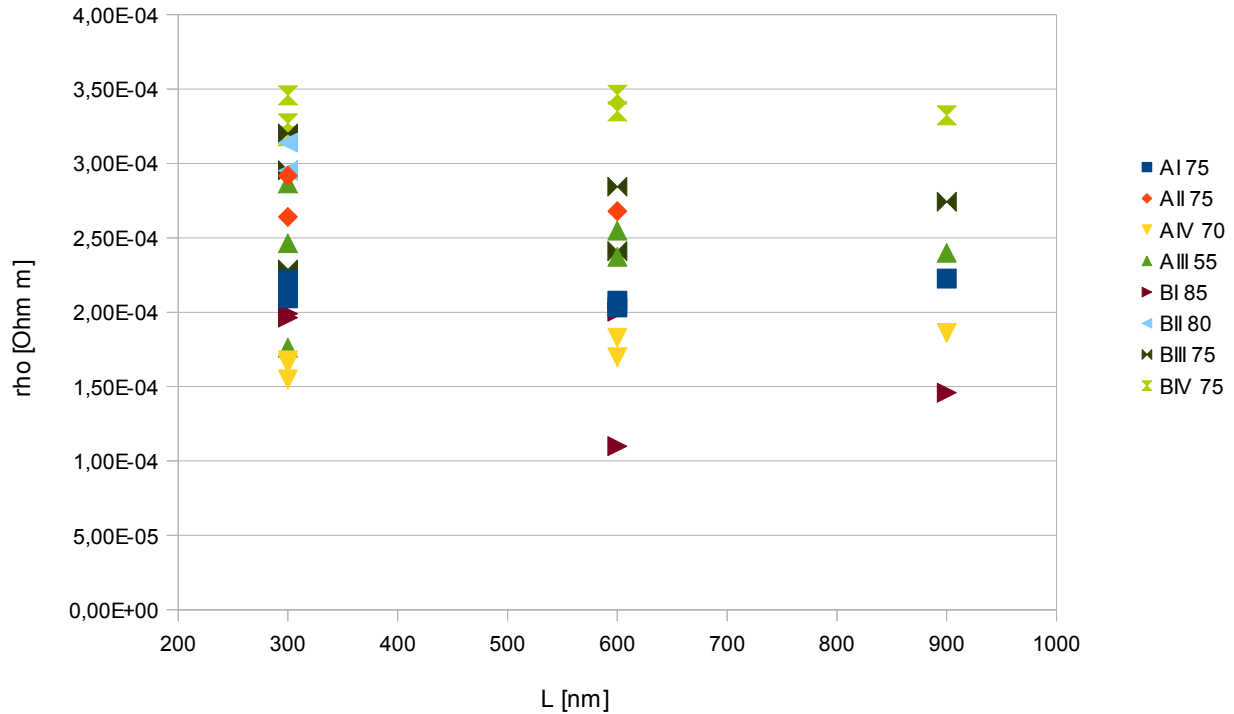


Ábra 21: Az a) elrendezésben az áram kilép a félvezetőből, ha fém kontaktus alá ér, míg a b) esetben a félvezetőben folyik tovább. Beláthattam, hogy esetünkben az a) ábra szerint folyik az áram, ami a kontaktusok megfelelő minőségére utal.

Ezzel a korrekcióval a hosszfüggés megszűnik, és ha az egyes szálak különböző szakaszain mért értékeket azonos színnel jelöljük, mint a 22. ábrán, jól láthatóvá válik, hogy az egyes száakon belüli szórás lényegesen kisebb, mint a különböző szálak közötti különbség.

rho(L), longueur corrigé

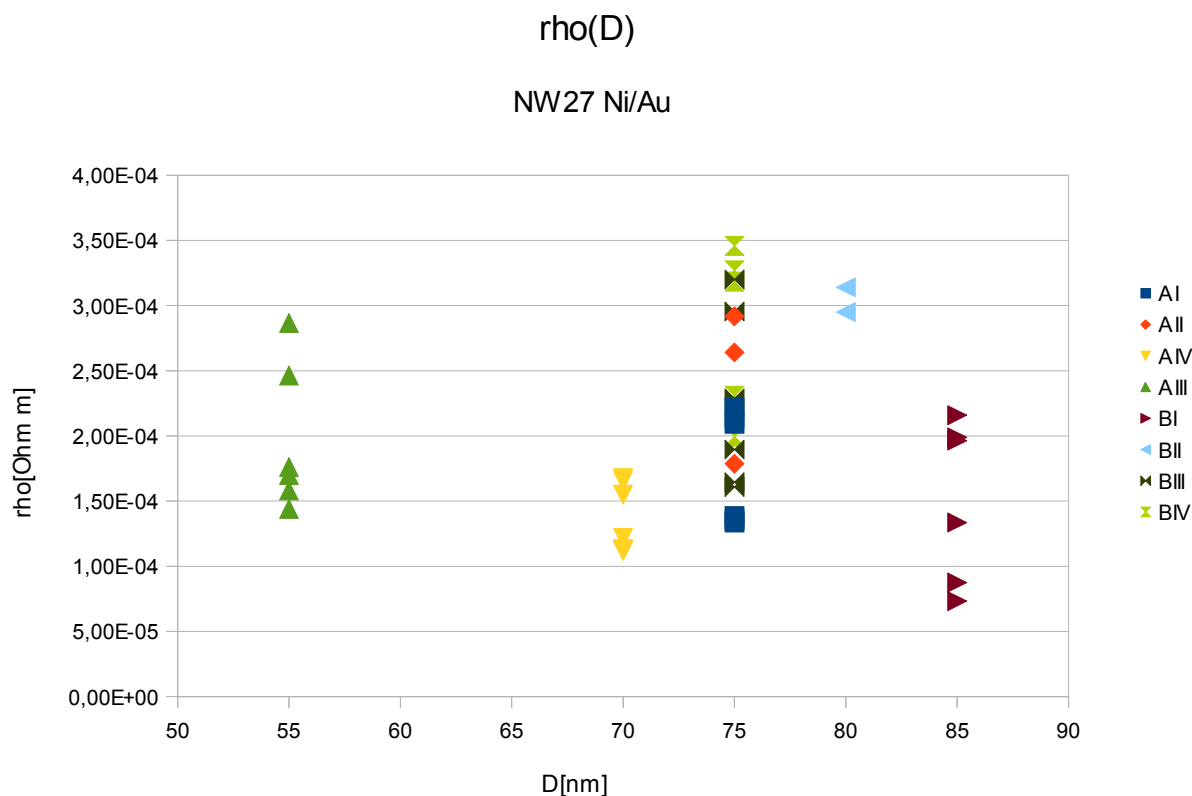
NW27 Ni/Au, plage de fit coupée



Ábra 22: A korrigált hosszal számolt fajlagos ellenállás. Az adatok szálanként vannak kigyűjtve, a jelmagyarázatban az átmérőket is feltüntettem nm-ben. Ez az ábra Ni kontaktusokkal készült.

Ez azt jelenti, hogy az adott körülmények között a szálak közötti különbségek ill. a környezet hatása (az oxidrétegbe csapdázódott töltések, a környezetben lévő más szálak, ill. a kontaktusok geometriai alakja) fontosabb, mint a kontaktok változása, tehát a kontaktusok egyenletesen jó minőségűek.

Az átmérőfüggést direkt módon ábrázoló grafikonról nem tudunk hasonló tendenciát leolvasni. Az átmérőfüggést mutató 23. ábra alapján azt mondhatjuk, hogy az egyes szálakhoz tartozó értékek szórása nagyobb vagy közel azonos, mint a szálak közötti szórás.



Ábra 23: Különböző átmérőjű nanoszálak vezetőképessége

Fontos ugyanakkor megemlíteni a hőkezelés hatását a fajlagos ellenállásra.

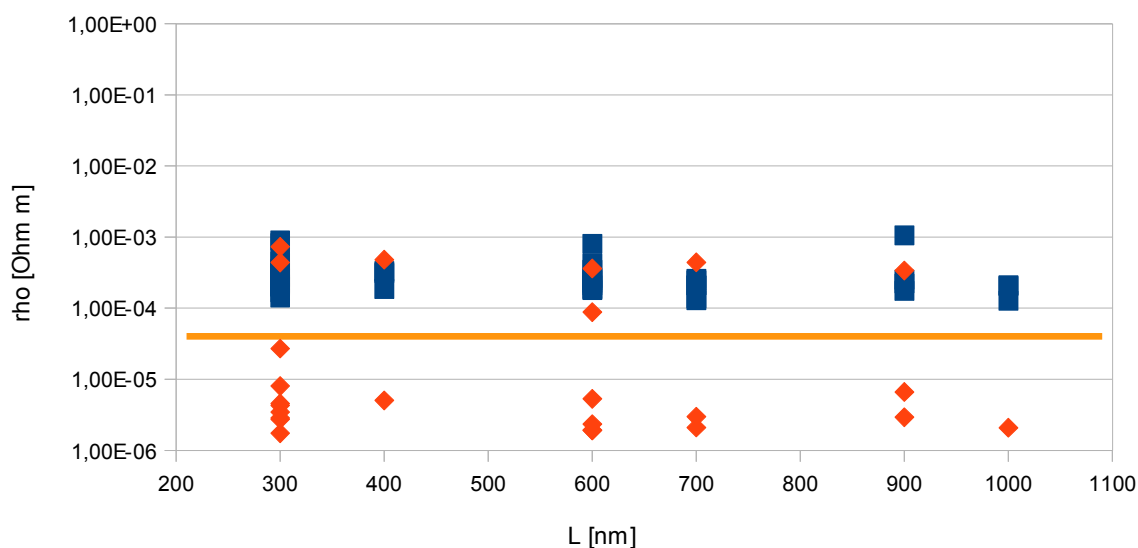
A hőkezelést a Ni, Pd és Ti mintákon végeztem el, ezek voltak ugyanis az első körben elkészített mintáim. A Ti kontaktusok kihozatali aránya viszont sajnos már a hőkezelés előtt sem volt túl magas, azonban a hőkezelést követően csak elvétve volt egy-egy vezető szakasz, ezért még hárompont-méréseket sem tudtam végezni. A második körben kivitelezett Ti és Pt minták esetén pedig idő hiányában nem volt lehetőségem a hőkezelést megismételni, ezért a hőkezelt kontaktusok vizsgálata csak a Ni és a Pd mintákra terjedt ki.

A 24. ábrán látható Ni kontaktusok hőkezelésének eredményeként létrejövő fajlagos ellenállás értékek, míg a 25. ábrán ugyanez látható Pd kontaktusokra. Míg a hőkezelés előtt a tömbi InSb fajlagos ellenállás két-háromszorosát mértem, addig hőkezelés után ennél lényegesen kisebb értékeket. A fajlagos ellenállás tömbi értékénél kisebb értéke tiszta InSb esetén nem valószínű, hogy előállna, így a mért eredmények azt mutatják, hogy a Ni és a Pd atomok diffundáltak bele a nanoszálba. Ez a megállapítás teljes összhangban van a tervezérelt méréseknél levont konklúzióval.

Megállapíthatjuk tehát, hogy a hőkezelés kitűzött célja, hogy a kontaktusnál használt fém atomjait a nanoszálba diffundáltassuk, sikerült elérni.

A hőkezelés hatása a fajlagos ellenállásra

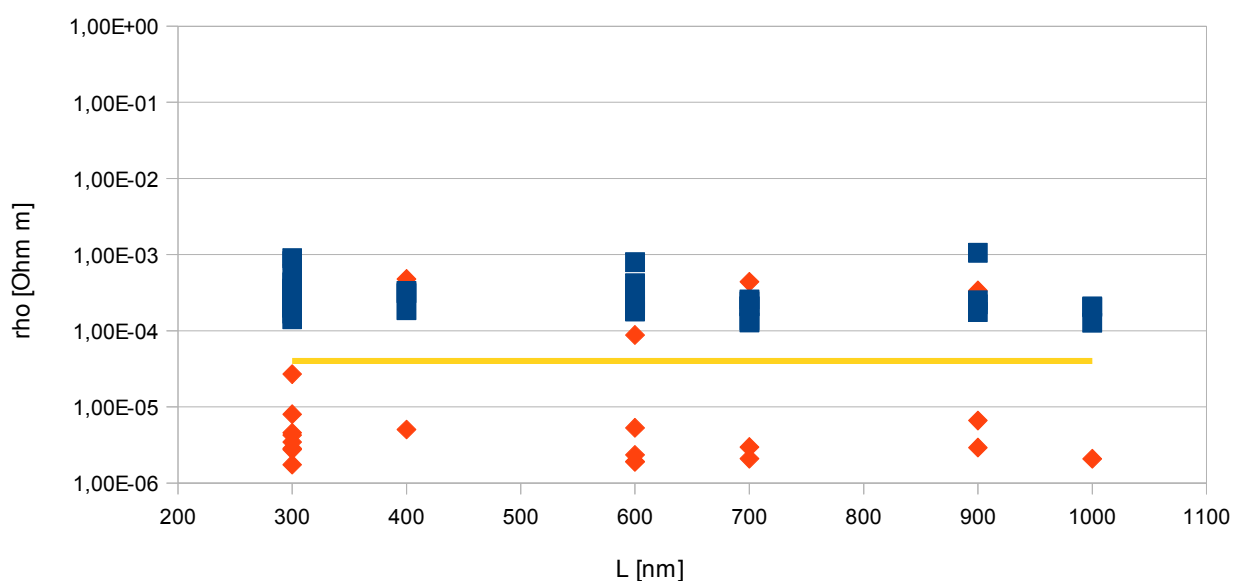
Ni kontaktusokra



Ábra 24: A Ni kontaktusok hőkezelésének hatása a fajlagos ellenállásra. Az ábrán nagyszerűen látható, hogy a tömbi fajlagosellenállás-értékhez képest (sárga vonal) a kékkel jelölt, hőkezelés nélküli értékek mintegy 2-3-szor nagyobbak. A hőkezelés utáni értékeket jelölő narancs rombuszok közül a többség ugyanakkor bőven a tömbi InSb fajlagos ellenállás alatti, de a Ni ellenállása fölötti értéket vesz fel.

A hőkezelés hatása a fajlagos ellenállásra

Pd kontaktusokra



Ábra 25: A hőkezelés hatása Pd kontaktusokra.

Kontakt ellenállások

A dolgozat egyik fő feladata volt a vizsgált fémekkel alkotott kontaktusok összehasonlítása. Ezt szobahőmérsékleten a kontaktus ellenállásával lehet leginkább jellemezni.

A kontaktus ellenállások értékeit a hárompont-mérések már ismertetett módszere alapján határoztam meg. A meglehetősen nagy számú mintában a kontaktusok nagy része egy nagyságrendbe esett, néhány száz ohmos érték környékén volt. Ugyanakkor néhány kontaktus értéke jelentősen meghaladta az átlagos értéket és 1-10k Ω értékekig is megnőttek. A nagyságrendi különbségek miatt nem volt célszerű a kapott értékek átlagolása a fémek jellemzésére, sokkal célszerűbb volt az adatsor mediánját venni az adott adatsor jellemző értékének.

Az alábbi táblázat minden cellájába tehát mintától függően kb. 10-20 mérés mediánját írtam. Referenciaként odaírtam az átlagot és a szórást is

Normál	Pd	Ni	Ti	Pt
Median	44,3	34,8	937,9	77852,0
Átlag	2656,0	34,7	1730,5	2077155,4
Szórás	8601,0	17,8	1757,5	4246449,1

Hőkezelt	Pd	Ni
Median	26,6	60,8
Átlag	522,0	170,3
Szórás	1010,0	239,5

Táblázat 1: A kontaktus ellenállások értékei az egyes fémek esetében

Általánosságban megjegyzendő, hogy a Ni és a Pd kontaktusok lényegesen könnyebben kezelhetők voltak, mint a Ti és a Pt. Gond nélkül sikerült az első minta és egyenletesen jól teljesítettek. Ezért mindkét fém igen ígéretes a további felhasználás szempontjából: a Ni ferrokontaktként használható majd a későbbiekben, Pd pedig az alacsony hőmérsékletű felhasználásra az inkább esélyes. Mindkét fémnél sikerült hőkezeléssel a diffúziót elősegítenünk, ami azonban csak a Pd esetében vezetett ellenállás-csökkenéshez.

A Pt igen nehezen kezelhető anyag volt, az áramkörök nem vagy csak nehezen tapadtak meg a szubsztráton. Sikeres mérés esetén nagy ellenállása pedig azt mutatja, hogy ezt a fémeket ezzel az eljárással biztos, hogy nem érdemes kontaktusfémként használni.

A Ti referenciaként szerepelt a repertoárban, de az adatokat látva elmondható, hogy van nála sokkal jobb választás szobahőmérsékleten. Azonban szupravezető tulajdonsága miatt lehet, hogy alacsony hőmérsékleten való kontaktáláshoz alkalmasabb lesz.

Jelen dolgozatom csupán a szoba-hőmérsékletű ellenállások vizsgálatára terjedt ki, mert a gyakorlat korlátozott ideje nem tette lehetővé az alacsony hőmérsékletes mérések kivitelezését, azonban a legelső kiterjesztését ennek a tanulmánynak az alacsony hőmérséklet irányába célszerű tenni.

Összefoglalás

Ebben a dolgozatomban bemutattam egy InSb nanoszálak kontaktálására irányuló kísérleti munkát, amely során ezen új és ígéretes félvezető elektronikai felhasználását megkönnyítő ohmikus kontaktálását dolgoztam fel. A munka az előkészítés után a minták előállításából, karakterizációjából és a mérések kiértékeléséből állt, melyet sikeresen véghezvittem.

A dolgozatban feldolgoztam a szükséges elméleti háttérrel és a mérési módszereket. Ezeket alkalmazva igen sok mérést végrehajtottam négy különböző fémmel és kiértékeltem az ellenállásértékeket. Sikerült találni olyan fémeket (Ni és Pd), amelyek alkalmazásával az ohmikus kontaktok elérhetőek szobahőmérsékleten, és az ellenállások értékei igen alacsonyak, amelyek elhanyagolható módon zavarják csak a szálak vezetését.

A dolgozatban ezen túlmutatóan releváns megállapításokat tettem a szálakban folyó áramról és a hőkezelés hatásáról is.

- [1] V. Mourik, K. Zuo, S. M. Frolov, S. R. Plissard, E. P. A. M. Bakkers, L. P. Kouwenhoven, "Signatures of Majorana Fermions in Hybrid Superconductor-Semiconductor Nanowire Devices", *Science*, 336, 6084 (2012)
- [2] Leo P. Kouwenhoven, Charles M. Marcus, Paul L. Mceuen, Seigo Tarucha, Robert M. Westervelt, And Ned S. Wingreen, „Electron transport in quantum dots”, *Mesoscopic Electron Transport*, (1997)
- [3] Nilsson, H.A. et al. "Correlation-induced conductance suppression at level degeneracy in a quantum dot", *Physical Review Letters*, 104(18). 186804. (2010)
- [4] C.M. Lieber, Z.L. Wang, „Functional Nanowires”, *MRS Bull.* 32, 99 (2007)
- [5] I. Shorubalko, R. Leturcq, A. Pfund, D. Tyndall, R. Krischek, S. Schon, K. Ensslin, "Self-Aligned Charge Read-Out for InAs Nanowire Quantum Dots", *Nanoletters* 8, 382 (2008)
- [6] C. A. Mead, W. G. Spitzer, „Fermi Level Position at Semiconductor Surfaces”, *Phys. Rev. Lett.* 10, 471–472 (1963)
- [7] S. M. Sze, Kwok K. Ng., „*Physics of Semiconductor Devices*”, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2007
- [8] Philippe Caroff, Jakob B. Wagner, Kimberly A. Dick, Henrik A. Nilsson, Mattias Jeppsson, Knut Deppert, Lars Samuelson, L. Reine Wallenberg, Lars-Erik Wernersson, „High-Quality InAs/InSb Nanowire Heterostructures Grown by Metal–Organic Vapor-Phase Epitaxy”, *Small*, 4, No. 7, 878-882 (2008)
- [9] J.R. Söderstrom, J. Y. Yao, T.G. Andersson, „Observation of resonant tunneling in InSb/AlInSb doublebarrier structures”, *Appl. Phys. Lett.*, 58, 708 (1991)
- [10] M. I. Khan, X. Wang, X. Jing, K. N. Bozhilov, C. S. Ozkan, „Study of a single InSb nanowire fabricated via DC electrodeposition in porous templates”, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 8, 1-6 (2008)
- [11] H. Ipser, K. W. Richter, „Ni, Pd, or Pt as Contact Materials for GaSb and InSb Semiconductors: Phase Diagrams”, *J. El. Mat.* 32, No. 11 (2003)
- [12] M. V. Rao, P. E. Thompson, R. Echard, S. Mulpuri, A. K. Berry, H. B. Dietrich, „Be, S, Si, and Ne ion implantation in InSb grown on GaAs”, *J. Appl. Phys.*, 69, 8, 4228-4233 (1991)
- [13] G. Eftekhari, „Electrical characteristics of metal/*n*-InSb contacts with InSb annealed rapidly prior to metal evaporation” *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13**, 2134 (1995)
- [14] Wunnicke et al., *APL* 89, 083102 (2006)