

ZÁRÓJELENTÉS
a
Félvezető szenzorok elektronikus zajának eredete
c. OTKA projektről
OTKA szám: T 037706, futamidő: 2002-2005

A projektnek három fő célja volt. Ezek:

1. Az alacsonyfrekvenciás zaj mérésére alkalmas laboratórium létrehozása.
2. Az MFA-ban előállított, illetve kutatott-fejlesztett szenzorok zajának eredetét felderíteni.
3. A harmadik ugyancsak fontos feladat a nemzetközi és hazai kapcsolatok kiépítése ezen a területen.

Jelen beszámoló e pontok szerint veszi sorra az eredményeket.

1. Laboratórium létrehozása

A labor felszerelése 2005-ben fejeződött be, ennek oka, hogy a támogatás nagy része 2004-re és 2005-re esett, az elvonások miatt a legnagyobb beruházást – a spektrum analízátort - csak az utolsó évben tudtuk megvenni, majd ez után a költöttük el a maradékot kisebb műszerekre, nagyrészt előerősítőkre. A spektrum analízátor tárgyában a közbeszerzési eljárást folytattunk le. A korábbi években a régi analóg HP spektrum analízátorunkat (HP 3580A) használtunk, melynek frekvenciaátfogása és főleg lassúsága erősen korlátozta a munka hatékonyságát. A támogatásból az első három évben csak kisebb beruházásokra futotta, a labor fejlesztések zömét a házi készítésű mintatartók, szűrők, erősítők képezték. A spektrum analízátor beszerzésének az utolsó évre való elhúzódnása viszont azzal az előnnyel járt, hogy most már a tervezettnél lényegesen korszerűbb és - az USA \$ gyenge árfolyama miatt – olcsóbb berendezést tudunk vásárolni, marad pénzünk igazán márkás előerősítőkre is. A 2003, 2004 és 2005 évi különböző pénzügyi elvonások a témát fokozottan érintették, mivel az utolsó két évre jutott a támogatás zöme. Összesen több mint 2 Mft-tal csökkent a projekt költségvetése a tervezetthez képest. Az elvonások során a beruházási pénzekhez nem nyúltunk hozzá, a folyó költségek hiányát sikerült más projektekből pótolni. A projekt során beszerzett fontosabb eszközök:

- SR 785 Kétcsatornás dinamikus jel analízátor (gyártó: Stanford Research Systems)
- SR 570 alacsony zajú áram előerősítő (gyártó: Stanford Research Systems)
- SR 560 alacsony zajú előerősítő (gyártó: Stanford Research Systems)
- 5183 és 5184 típusú előerősítők (gyártó: AMETEK Signal Recovery, korábban Princeton Applied Research)
- 181 típusú Áram Előerősítő (gyártó: AMETEK Signal Recovery, korábban Princeton Applied Research)
- ADC-2166 PC oszcilloszkóp, gyártó: pico (U.K)

A felsorolt előerősítők mind más-más impedanciájú jelforrás (minta) mérésére optimalizáltak.



A fénykép mutatja a mérési összeállítást. Középen az SR785 tip. Spektrum analízátor, lejjebb balra 4 előerősítő. Lent középen a saját készítésű mintatartó (kék), melyben mesterséges atmoszférát is létre lehet hozni.

2. A vizsgált szenzorok, illetve szenzor anyagok

2.1. Pórusos Si.

A pórusos szilícium szerkezeti anyaga sokfajta szenzornak, ezért elektromos zaj tulajdonságai jelentőséggel bírnak. A választott minta: p típusú kristályos szilíciumon anódikus marással létrehozott pórusos réteg Al –mal kontaktálva. A szelet hátoldalán diffúzióval és szintereléssel kialakított ohmos kontaktus van. Így ezen a kétpólusú eszközön mérve a pórusos anyag tulajdonságait vizsgálhattuk. Az áram-feszültség karakterisztikákat és a zajspektrum feszültségfüggését mértük. Az áram-feszültség karakterisztikák nagyobb nyitó irányú előfeszítésnél a Fowler-Nordheim-féle alagútárammal írhatók le, de kis előfeszítéseknél az áram több mint ami e mechanizmusból következik. A – nagyellenállású szerkezet – zajspektruma tipikus $1/f$ jellegű zajt mutat, de a zaj amplitúdója a feszültség növelésével telítődésbe megy. E szokatlan jelenség rövid magyarázata az, hogy a pórusos Si-on két párhuzamos áramvezetési mechanizmus létezik: a Fowler-Nordheim-féle alagútáram és kisebb feszültségeknél a csapdák segített alagútáram. Ez utóbbi a feszültség növelésével telítésbe jut, de ezt az áram – feszültség karakterisztikán nem lehet észlelni, ugyanis a telítéshez tartozó feszültségeknél a Fowler-Nordheim-féle áram már nagyságrendekkel nagyobb. Az alacsonyfrekvenciás zajt viszont ez a csapdák keresztüli áramvezetés határozza meg, ennek zaja jóval nagyobb a Fowler-Nordheim-féle alagútáramnál és elnyomja azt. A zajt a csapdák betöltöttségének fluktuációja okozza. A megfigyelt zaj jellege is alátámasztja ezt a magyarázatot, ugyanis a Fowler-Nordheim-féle áram zaja fehér söréztaj lenne, míg a csapdákon történő hopping zaja lehet $1/f$ jellegű. Tehát a két párhuzamos áram közül a kisebbikhez tartozik a nagyobb zaj.

Az eredményekről több publikáció jelent meg, melyekben egyre finomabban vizsgáljuk és részletesebben interpretáljuk a jelenséget, és végül sávszerkezeti diagrammot is tudunk javasolni.

2.2. InP alapú infravörös LED-ek

Az InP alapú infravörös LED diódákat Intézetünk Rakovics Vilmos vezetésével állítja elő hordozható infravörös spektroszkópok céljára. A közvetlen együttműködő partner a Rikola Ltd (Finnország). Az ő észrevételük volt, hogy néhány sorozatnál a LED diódák fényárama ingadozik. Ennek a jelenségnek a nyomába eredtünk, találtunk is különbséget egyes diódák zaja közt, de ezt nem tudtuk a technológiával korrelációba hozni. A további együttműködés során kiderült, hogy az általunk talált eltérések nagyságrendileg kisebbek, mint a Rikola Ltd-nél megfigyeltek. Végül is az derült ki, hogy az általunk szerelt diódák -amiken mi kezdtük a vizsgálatokat - zaja és annak szórása sokkal kisebb, mint ugyan abból a sorozatból Finnországban szerelték. Végül is a partner elismerte, hogy az ő beültetési (forrasztási) technikája a rossz, tanácsainkat megfogadva megoldotta a problémát. Az egész probléma kezelésében döntő szerepe volt annak, hogy tudományos igényességgel mértük a LED –ek fényáramának zaját.

2.3. PbS fotóellenállások.

A PbS fotóellenállások a közeli infravörös tartományban működnek, az érzékelési határhullámhossz akár 3 mikrométerig kiterjeszhető. A 2-3 mikrométer közötti tartományban működő detektorok közül általában ezek mutatják a legjobb jel-zaj viszonyt, ezért közkedveltek. A fotóérzékeny polikristályos réteget nedveskémiai leválasztással lehet leghatékonyabban előállítani. Nálunk Rakovics Vilmos állít elő ilyen eszközöket. Az irodalom immár ötven éve foglalkozik ezzel az anyaggal, de még nem sikerült teljes mélységgel kideríteni, azt a kérdést, hogy pontosan milyen elektron energia nívók vesznek részt a fotóvezetésben. (tömbi vagy szemcsehatáron lévő állapotok, az utóbbiak köthetők-e az oxigén abszorpcióhoz, stb.) Az optimális detektorparaméterek elérése mellett, próbáltunk minél több információt összegyűjteni, a feltételezett fotóvezetési mechanizmusok érvényességének a vizsgálata céljából. A nagy fotóérzékenységű minták morfológiája abban tér el az érzékenyítetlen mintákétól, hogy a kristálméret eloszlása sokkal kisebb szórással rendelkezik, és az átlagos kristálméret is kisebb. Ez, több irodalmi adattal egyezően a szemcsehatáron lévő állapotok fontos szerepére utal. Azt találtuk, hogy bár az oxigén beépülése döntően befolyásolja a szabad töltéshordozók koncentrációját, a fotóérzékenység kialakulását nem lehet csak az oxigén nívók szerepével leírni. A detektorokon mért zaj jellegét a zajspektrum értékelésével állapítottuk meg. A domináns zaj a generációs-rekombinációs zaj, tehát annak a folyamatnak a zaja, ami az érzékelés alapja. A zajspektrumok törésfrekvenciájából a töltéshordozók élettartamára kb. 0.1 ms adódik, mi megegyezik más módszerrel mért irodalmi adatokkal. Minden más zaj (flicker zaj, termikus zaj, sörétzaj, stb.) kisebb ennél. Ez a detektor anyagunk ideális voltát bizonyítja, hiszen a zaj csak az érzékenységgel együtt lehetne kisebb. PbS polikristályos rétegek felületén adszorbeálódó gázok hatására változik az elektromos ellenállás. A levegőn tartott minták hosszú tárolás után is megtartották eredeti tulajdonságaikat. Enyhe hőkezelést vagy UV megvilágítást alkalmazva a rétegellenállás akár egy nagyságrendet is eltolódik, de sötétben szobahőmérsékleten tárolva viszonylag hamar visszakerülnek a minták egy stabil egyensúlyi állapotba, ami lényegileg megegyezik az előállítás után mért állapottal. Méréseket végeztünk frissen készített és öt éve a szekrényben tárolt mintáinkon. Nem találtunk öregedésre utaló jelet, tehát igazoltuk a mintáink stabilitását, csak az említett UV és hőkezelési kérdéseket kell kézben tartani. Ezek egyébként ugyan így hatnak a kereskedelmi forgalomban beszerezhető PbS detektorokra is. A HAMATSU-tól vásárolt és referenciaként használt fotóellenállás

zaja, érzékenysége és UV-vel való befolyásolhatósága, illetve a regenerálhatósága teljesen hasonló volt a miénkhez. Ezzel kapcsolatban érdemes megjegyezni, hogy viszonylag nagy értékű eszköztől van szó, egy olyan detektor, amelyet mi is előállítunk 110 EURO körüli áron kapható. Jelenleg az AQUANAL projektben használjuk ezeket a saját előállítású eszközöket.

2.4. Piezo ellenállások

Az intézetben nagy hagyománya van a nyomásérzékelők kutatásának/fejlesztésének, kissorozatú előállítás is folyik ezen eszközökből. Az érzékelő elem n típusú Si-ba B ion implantálással készített p típusú ellenállás, melyet így p-n átmenet választ el a hordozótól. Ezután a hordozó hátoldalát az ellenállások alatt részben kimarják és így az ellenállások egy rugalmas membránra kerülnek. A nyomás hatására deformálódó membránon két ellenállás hosszanti, kettő pedig keresztirányú feszültségnek van kitéve, a négy ellenállást alkalmasan Wheatstone hídba kapcsolva az érzékenység megkétszerezhető. Az implantációs technikára azért van szükség, hogy az a piezo-ellenállások vékonyak (2-mikrométer körüli vastagság) legyenek és így a teljes térfogatuk a maximálisan deformálódó tartományba essen. A feszültségtér változása az ellenálláson belül elhanyagolható. A nyomás detektoroktól a gyakorlatban nem várnak el olyan pontosságot, hogy a zajuk komolyan szóba jöjjön, leolvasásuk is viszonylag ritka, mód van nagy időállandóval átlagolni, azaz szűrni a zajt. A dolog viszont sokkal élesebben merül fel a jelenleg a SZTAKI-val közösen fejlesztett tapintó szenzor esetén. Itt a kutatás végső célja egy olyan robot megalkotása, melynek tapintó érzékelése az emberével összemérhető, vagy az meghaladja mind pontosság, mind térbeli felbontás tekintetében. Az első erre a célra fejlesztett csipen 256 piezo-ellenállás van, melyeket természetesen már nem lehet párhuzamosan kivezetni, kiolvasásuk sorosan történik, jelenleg még csak kHz körüli frekvencián. Ilyen körülmények közt az ellenállások zaja már komolyan figyelembe veendő korlátozó tényező.

Munkánk során eredetileg az ion implantálást követő hőkezelés zaj szempontból való optimalizálására készültünk, ez a hőkezelés ugyanis csak az ellenállás minimalizálásával lett beállítva. A zaj viszont ennél lényegesen finomabb jelenség. Az első vizsgálatok szerint az egyes ellenállások zajának spektruma $1/f$ jellegű, a zaj nagysága viszont erősen különbözik mintáról mintára. A zaj feszültségfüggése sok esetben értelmezhetetlen volt, nem ellenállás fluktuációra utalt. A helyzet akkor kezdett tisztázódni, amikor a p-n átmenet áram-feszültség karakterisztikájával kerestem a korrelációt. Ugyanis arról van szó, hogy az n típusú hordozó működés közben nincs elektromosan bekötve az áramkörbe, lebegő potenciálon van. Ez a lebegő potenciál, pedig valamivel negatívabb, mint az ellenállás pozitív kontaktusán lévő feszültség, így az ellenállás egy része nyitó, más része záró irányban lesz előfeszítve a hordozóhoz képest. Az előfeszítés az ellenállás mentén pontról-pontra változik. Ez az előfeszítés természetesen olyan, hogy az ellenállás és a szubsztrát közt folyó nyitó és záró áramok összege nulla. Itt van jelentősége a p-n átmenetnek, melynek tulajdonságaira senki sem optimalizálja a technológiát. A „kemény” áram-feszültség karakterisztikájú p-n átmenet esetén - amikor a záróáram kicsiny – a hordozónak ez a söntölő hatása kicsi és az ellenálláson mért zaj feszültségfüggése ellenállászajra utal, jellege $1/f$, de nagysága sokkal kisebb, mint az irodalomban eddig az implantált ellenállásokra közölt érték. Amikor viszont a záró karakterisztika „lágy”, a nyilván zajos záróáram hatását látjuk a mért zajon és a feszültségfüggés már nem az ellenállás-zajra jellemző.

E vizsgálatok rendszerezésére és összegzésére 2006 első felében kerül majd sor.

2.5. A szenzorok alkalmazásának zaj okozta korlátai.

A szenzorok műszaki paramétereinek, mint érzékenység, felbontás, működési (kiolvasási) sebesség zaj okozta elvi korlátainak a vizsgálatáról van szó. Erről a témáról felkérésre már tartottam egy meghívott előadást, a téma folyóiratcikkben való részletesebb kifejtésén még dolgozok.

3. A nemzetközi és hazai kapcsolatokról

Az OTKA támogatásának köszönhetően módomban volt minden évben részt venni az 5-6 konferenciát magában foglaló SPIE rendezvényen, a Fluctuation and Noise Symposiumon. Ez a zaj szakterület új és legfontosabb fóruma. A konferencia bizottsági tagja vagyok. 2003-ban még csak poszterrel voltam jelen, 2004-ben és 2005-ben meghívott előadást is tartottam és szekció elnök is voltam. Ezen a fórumon ismerkedtem meg Prof. Jungil Lee-vel, egy (dél)koreai kutatócsoport vezetőjével, 2005-ben közös előadásunk is volt a konferencián, valamint 2004-ben nyertünk egy TÉT projektet, ami a jövőben a személyes kapcsolattartást fedezné, amennyiben az illetékes hivatalokban az ügyek előre mozognának. (Sajnos más Tét projektek esetében is magyar részről gyakorlatilag teljes működésképtelenséget tapasztalok.) Egyelőre a kapcsolat levelezési szinten él.

Idehaza az MFA-ban folyó szenzor kutatások/fejlesztések gondolatvilágába bekerült az elektronikus zaj fogalma, tartottam intézeti szemináriumot is a témáról. A publikációk szerzői listájából kiderül, hogy kapcsolatba kerültek egy-egy téma erejéig olyan nagytapasztalatú kutatók is a zaj témával, akik korábban nem foglalkoztak ezzel a szakterülettel. Az intézetben működő diplomamunkásokat és PhD hallgatókat sikerrel vontam be a munkába és kialakuló szakmai kultúrájukban sikerült többé kevésbé nyomot hagyni az elektronikus zaj kérdéskörének. Az OTKA biztosít évi 120 kFt –ot ösztöndíj-kiegészítés céljára. Ezt az összeget – mint az egyetlen személyi jellegű kifizetést – sikerült megőrizni az elvonások ellenére. Ebből a pénzből juttattam a diákoknak. Sorrendben: Fürjes Péter (PhD hallgató korában), Oláh István (diplomamunkás korában), Klagyivik László és Hargitai Zoltán (mérnök gyakornokként), Németh Ágoston és Kuthi Edvárd Bálint (PhD hallgató-, illetve fiatal kutatóként), Lackovich Géza (TDK és diplomamunkásként) került/kerül kapcsolatba a témával és tanul meg többet az elektronikus zajról, mint amit az egyetemi oktatásban kapott.