

Válasz
Dr. Gingl Zoltán az MTA doktora
Földesy Péter “Integrált érzékelés és jelfeldolgozás a fókusz síkban” című MTA
doktori disszertációjához készített bírálatára

Szeretném megköszönni a Professzor Úrnak az alapos és részletes bírálatot, az elgondolkodtató kérdéseket és a bírálatra szánt idejét.

A dolgozat kivitelével kapcsolatban a Professzor Úr számos stilisztikai és nyelvtani egyeztetési hibára hívta fel a figyelmem. Ezek a hiányosságok annak ellenére maradtak a dolgozatban, hogy különböző foglalkozású barátaim, családtagom, fizikus, esztéta, mérnök, lektorálták folyamatosan a munka előrehaladtával és többszöri újraíráson esett át a dolgozat. Igazán sajnálom, hogy nem sikerült ezeket a problémákat kiküszöbölnöm.

Köszönöm a tézisek átszerkesztésével, csoportosításával kapcsolatos ésszerű javaslatait.

- Az II.1., II.2, II.3. pontok valóban egyetlen átfogó munka eredményének részei. A csoport fő mondanivalóját az elméleti úton levezetett II.2 pont adja “a tervezérelt tranzistorok THz-es sugárzásra adott válasza [...], a transzkonduktancia és a csatorna áram hányadosával arányos (gm/ID)” gondolattal.
A II.1. tézispont inkább gyakorlati, metodikai megközelítése a modellalkotásnak, melynek eredménye a II.3. pont, azaz a korábban megjelentetett modellek hibás hatásmechanizmusa.
Az téziscsoporthoz rendelt egyetlen közlemény indoklása pedig az, hogy összefoglaló Journal of Applied Physics folyóiratcikkben jelentettem meg a fenti, összetartozó megállapításokat.
- Az I.1. és I.2. pontok kérdésében egy hosszabb, több résztvevővel bíró kutatómunka egyértelműen hozzám köthető eredményeit kívántam kiemelni. Az eredmények tézispontokká strukturálása helyett valóban szerencsésebb lett volna alpontonként megfogalmazni azokat.
- A II.4., II.5. és II.6. pontok tekinthetők olyan csoportként, melyek a gyakorlati alkalmazás során felfedezett megoldásokat foglalja össze.

Fókusz síkbeli érzékelő-processzor architektúrák fejezettel kapcsolatos kérdésekre adott válaszaim:

- *“Milyen partnerekről és projektekről van szó, milyen főbb szerepük volt az értekezésben bemutatott kutatáshoz kapcsolódó együttműködésben?”*
A leírt 2D áramkörök architektúrájának kialakítása kizárólag a saját csoportunkban szakmai vezetésemmel és aktív részvételemmel történtek. Az architektúrák részleteinek kidolgozása teljesen és az FPGA implementációjuk

részben szintén a saját eredményeim, a DSP programok pedig kollégáim feladata volt.

A 3D foveális megvalósításban és a nano-antennák esetében a helyzet más volt. Egy USA ONR-BAA VISCUBE projekt finanszírozásában a különböző a rétegek (szenzor, analóg tömb, 3D integráció) megtervezése, integrálása és rendszerépítése külföldi kutatócsoportok feladata volt (Dr. Rekeczky Csaba vezetésével a Eutecus, Inc., Berkeley, CA, USA; Angel Rodríguez-Vázquez professzor vezetésével pedig az Instituto de Microelectrónica de Sevilla, (IMSE-CNM), Sevilla, Spanyolország). Ebben a projektben személy szerint a processzortömb rétegért voltam felelős.

Az I.2. tézispont szenzorarchitektúrája és megvalósítása önálló eredményem.

- *“A 2.6.1. fejezetben szerepel, hogy a dinamikus fogyasztás csökkentésének korlátja a tranzistorok jelentős szivárgási árama. Más technológiák alkalmazásával mekkora további csökkentés becsülhető?”*

A modern technológiákban a vékonyodó gate oxid és a csökkenő nyitófeszültség növeli a szivárgási áramot. Csökkenő geometriájú technológiák választásával ez a veszteség tovább növekszik. A technológia okozta hátrányt architektúrális megoldásokkal csökkentik, így csökkenteni a tápfeszültséget, a nem működő részelemek órajelének leállításával és tápfeszültségük kikapcsolásával (clock gating, power gating). Ezeket a megoldásokat rendszeresen alkalmaztam, így a dinamikus fogyasztás változása együtt járhat a statikus fogyasztás változásával. A fenti mondat pontosabban a teljes fogyasztás csökkentése lenne.

- *“A 36. oldalon tárgyalja az érzékelők sötétárama okozta hibát, melyet kompenzálhatónak tart a letakart szenzorok segítségével. Mennyire pontos és megbízható ez a módszer? A mérhető hasznos jeltartományhoz hogyan viszonyítható az okozott hiba? Kell-e számolni különböző nagyságú áramokkal, hőmérsékleteloszlással az érzékelőtömb különböző részein?”*

Az érzékelők sötétáramát a gyártási feltételek és a hőmérséklet határozza meg. Ez a sötétáram vagy szivárgás független az érzékelt fényáramtól. Az áramkör fogyasztása és ezért saját melegedése minimális, valamint a tokozás és a szilícium jó hővezető képessége miatt jelentős hőmérsékleti gradiens nem alakul ki a szenzortömb felületén. Ezért összességében alkalmazható ez a kompenzációs módszer, melyet általánosan alkalmaznak CMOS és CCD kamerák esetén is.

A hasznos jeltartományhoz képesti veszteség az időbeli integrálás (képkalkotás) idejétől függ. A dedikált optikai technológiák esetén a sötétáram elektronok számában kifejezhető érték másodpercenként és képpontonként. Az általam alkalmazott technológia egy digitális áramkörök számára optimalizált volt, ezért

jelentős a sötétáram és egyéb nem kontrollált szivárgások okozta veszteség (szobahőmérsékleten ~ 55 mV/sec a hasznos 1.2V tartományban), ennek ellenére az adaptációs eljárást bemutatását és alkalmazását ez nem akadályozta.

- *“A változtatható integrálási időnek milyen korlátai vannak a jel/zaj viszonyt, jel/hiba viszonyt is figyelembe véve?”*

A leghosszabb használt integrálási idő 0.1 másodperc (10 kép/mp) volt 5 usec felbontással. A nem optikai technológia nem csupán a fotódióda sötétáramában jelentett hátrányt, hanem a reset és shutter tranzisztorok záróirányú szivárgásában és a fotódetektorok érzékenységének nagy szórásában is. A konkrét megvalósításban pár másodperces integrálás után a megjelentek olyan képpontok, melyek szaturációba kerültek.

Szub-terahertzes sugárzások érzékelése és alkalmazása fejezettel kapcsolatban feltett kérdésekre adott válaszaim:

- *“A 43. oldalon lehallgathatatlan kommunikációt említ. Mit ért ez alatt?”*

Ez egy alkalmazás oldali általános kijelentés, abban az értelemben találtam, hogy a frekvencia növekedésével távolsági csillapítás, pl. a Friis egyenlettel leírva, négyzetesen növekszik. Azaz métereken belül érzékelhetetlenné válik, így egy távolabbi vevő számára “lehallgathatatlan” marad.

- *“A 49. oldalon beszámol arról, hogy a minták tönkrementek, de a megjelent publikációk ezt a jelenséget nem emelték ki. Nem emelték ki, vagy egyáltalán nem említették?”*

Ismereteim szerint nem említették. A gate oxide átütése erősen feszültség- és időfüggő jelenség, valamint az antenna csatolása, kialakítása befolyásolja a kialakuló feszültséget és annak időbeli lefolyását. Ezért nehéz összehasonlítani különböző kísérleteket. A femtosecond idejű pulzusok fizikai hatása egy összetett CMOS tranzisztor esetén általam nem ismert. A témakörben talált legközelebbi jelenségek, az ESD jellegű pulzusos terhelések (akár a human discharge model, akár a machine discharge model változatai) “csupán” nanoszekundum nagyságrendben kezelték az eszközöket.

- *“Több helyen szerepel, hogy az irodalomban a tranzisztorok érzékelési mechanizmusainak leírásában hibákat követtek el, ami félreértésekhez is vezetett. Mennyire volt ez hatással a közlemények eredményeire, különösen azok használatosságára? Kompenzálhatók-e adott elrendezésben az ilyen eredetű hibák?”*

A felsorolt modelleket korlátozott feszültség, terhelési, vagy hőmérséklet tartományú elrendezésekben mutatták be, mely mérési eredményekre részben vagy teljesen illeszthető volt az adott cikk által bevezetett modell. Az általam felismert tranzisztor DC működéséből fakadó módosító jelenségek (pl. a feszültségválasz előjelváltása) ezeket a feltevéseket fedi le általánosabb formában és teszi indokolatlanná. Ez a publikációk kísérleti eredményeit semmiképpen nem csorbítja, de tervezhetőbbé teszi a kísérleti elvárásokat.

- *“Fontos eredmény a helyes értelmezés megadása még akkor is, ha a hibák nem súlyosabbak. Kapott-e visszajelzést erről az érintett cikkek szerzőitől, eljuthattak-e hozzájuk az eredmény? Számít-e az eredményeinek jelentősebb hatására?”*

Részben igen, több kutató építette be az eredményt munkájába (független találatként és a cikkek bírálói részéről). Az összefoglaló cikkem megjelenésének idejében a témakör innovációs időszaka többé-kevésbé lezárult. Azaz a legtöbb elsőként érintett és publikált, citált csoport más témával kezdett foglalkozni és a sok kisebb csoport jelent meg nagyon sok alkalmazási és nem elméleti cikkel. Ebben a “zajban” kellő tudománypolitikai marketing hiányában esetleges a volt hatásgyakorlás.

- *“A 63. oldalon olvasható a megállapítás, hogy „szaturációban működő tranzisztor szaturált (nyelő) elektródája nem járul hozzá a kimenethez. Ez milyen pontossággal igaz, figyelembe véve az esetlegesen alkalmazott lock-in technika működési frekvenciáját is?”*

Köszönöm az érdekes kérdést. Több jellemző befolyásolja a szaturációs oldal választát: frekvencia, a tranzisztor feszültségviszonyai és fizikai jellemzői (nyitófeszültség). Az RF érzékenység szempontjából tekinthetünk két független tranzisztorként a csatornára (behatolási mélység rövideje okán). A nyelő oldalára értelmezve “A csökkenő feszültség esetén az exponenciálisan csökkenő csatornaáramhoz képest meghatározóvá válnak a szivárgási áramok, ezért a gm/Id arány is lecsökken, és nullához tart”. Noha a csatorna soha nem teljesen kiürített, ezért a nyelő oldalon is működik az érzékelési jelenség, azonban rendkívül kis hatásokkal. Továbbá a kis vezetőképesség ($dId/dVd \rightarrow 0$) miatt pedig a terhelés lecsökkenti a használható moduláció határfrekvenciáját jóval a gyakorlatban hasznos érték alá. A mérések során a mérési pontosság határáig nem tapasztaltam nyelő oldali hozzájárulást a szaturációs tartományban.

- *“A 16. közlemény egy magyar szabadalmi bejegyzés. Használja-e bárki az eredményt? Miért hazai a szabadalom? Milyen a szabadalom viszonya a 15. közleményhez?”* Véleményem szerint szabadalmi eljárásoknak és bejelentéseknek üzleti alapon van értelme. Azaz egy cég, intézmény valós vagy

szellemei értékét növelhetik vagy konkrét profitot hozhatnak. A 15. közlemény azonos tartalmú, a szabadalom bejelentése után került publikálásra (ne lehessen újdonságrontó hatású). A szabadalom hazai elsőbbségi ideje lejártával, konkrét felhasználás hiányában anyagi megfontolásból nem indítottuk el a nemzetközi folyamatot. Így maradt hazai az oltalmi kör.

- *“A 89. oldalon kiszámítja a jel/zaj viszonyt N detektorra az egy detektorra jutó érték ismeretében. A gyakorlatban milyen értékekben gondolkodhatunk egy detektor esetén? Hogyan kapható ez meg a hasznos jel és a fehér zaj tulajdonságainak ismeretében?”*

A legérzékenyebb általam tervezett detektor esetében a jel/zaj viszony 40-50 dB (~20000:1) volt elérhető az alábbi feltételekkel: a csatorna termikus zaja volt az alsó korlát és a rendelkezésre álló sugárforrás 0.7mW@340 GHz teljesítménye a felső jel nagyság korlátja. A DC feszültségválasz 1mV volt. A zajhatár ekvivalens sugárzási értéke ~5-20 pW beeső teljesítmény érzékelőként, ~20 nV/sqrtHz termikus zajjal.

Az érzékelés jelensége lényegesebb nagyobb beeső sugárzási teljesítmény mellett is hatásos (két nagyságrenddel nagyobb értékig publikáltak méréseket), bár a kvadratikus viselkedése romlik (A. Gutin, T. Ytterdal, V. Kachorovskii, A. Muraviev and M. Shur, "THz SPICE for Modeling Detectors and Nonquadratic Response at Large Input Signal," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 55-62, Jan. 2013.doi: 10.1109/JSEN.2012.2224105).

- *“Milyen esetekben lehet szükség ilyen megoldásra a jel/zaj viszony növelése érdekében?”*

Meglátásom szerint minden integrált áramköri megoldás, amelyben struktúrális javítás már nem hoz érdemi előrelépést és optikai úton növelnék az irányítottságot, 2x2 vagy 3x3 rezonáns antennához kapcsolt detektorral tovább javíthatja a jel/zaj viszonyt. Ez alól kivételt jelentenek azon esetek, amelyekben nincsen különbség a környezet és a hordozó optikai jellemzői között, melyre a módszer épít (pl. a szilícium optikával ellátott szilícium érzékelők).

- *“Több helyen lock-in technikát említ, ami nem csak az 1/f zajt csökkenti. Mennyire van szükség ennek alkalmazása mellett az említett jel/zaj viszony növelésre?”*

A lock-in technikát, pontosabban AM modulációt és homodin demodulációt, elsősorban az 1/f zaj csökkentése miatt használtam, kiemelten azért, mert a mérési környezet kisfrekvenciás zaja meghaladta az érzékelők termikus zaját. Ez a sugárforrásra is igaznak bizonyult. Ezzel a hosszabb méréseknél, képalkotásnál a válaszjel lassú driftje érdemi torzulást okozott volna. Ideálishoz

közelítő körülmények között nem indokolt önmagában a lock-in technika alkalmazása, de a gyakorlatban indokoltnak látom. Az AM moduláció teljesítménycsökkenést okoz, ezért FM moduláció, szuper-heterodin vevő megépítése hatékonyabb.

Az eredmények alátámasztottsága, hatása

Köszönöm, hogy a tisztelt bíráló támogatta a tézispontjaim tartalmát. A téziszfüzet 7-es, 8-as cikkei valóban azonosak és javítást igényelnek. E két, illetve egy, nem hivatkozott saját referencia egy komplex érzékelő és integrált lock-in erősítő áramkör leírása, mely több kísérlet közös platformja volt, azonban önmagában nem elméleti értékű fejlesztés volt. Valóban hivatkozás nélkül hiba volt felsorolni.

A tudományos életmű kis része támasztja alá az értekezés konkrétumait. A témaválasztásomat az vezette, hogy az eredmények folyamata jól követhető legyen és a magam részéről is értékesnek tartsam. A II.1.-II.6. pontokat alátámasztó eredmények rangos folyóiratban sikerült publikálnom, melyet követően új irányba fordult az érdeklődésem (mikrotechnológia, mikrofluidika) és ezáltal elhanyagoltam a hivatkozások növeléséhez elengedhetetlen együttműködések kiépítését, konferencia látogatásokat.

Végezetül, megköszönve Dr. Gingl Zoltán támogató véleményét, kérem a bírálatra adott válaszaim elfogadását.

Dunakeszi, 2018. Július 18.

Tisztelettel:

Dr. Földesy Péter