

dc\_365\_11

# **AZ ELEKTROMÁGNESES SUGÁRZÁS MÉRÉSÉNEK ÚJ MÓDSZEREI**

**MTA doktori értekezés tézisei**

**Szentpáli Béla**

**MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet**

**Budapest**

**2012**

## A kutatás tárgya és célkitűzései

Az utóbbi években az elektromágneses sugárzásoknak egyre újabb tömeges alkalmazásai jelentek meg. Ez a folyamat a mérés technika szempontjából új kihívásokat teremtett, új típusú szenzorokat igényelt. Ebben az értekezésben három ilyen területen végzett munkámról, szenzor fejlesztésről számolok be. Valamennyi esetben igyekeztem figyelembe venni az elektronikus zaj állította korlátokat.

A rohamosan terjedő rádiós és mikrohullámú alkalmazások új, a természetben nem található elektromágneses környezetet hoznak létre. Ezek közül a legintenzívebb a mobiltelefon készülékek használata. Eltekintve az ezzel kapcsolatos időnként fellángoló lakossági hisztériától, a kérdés szabatos tudományos kezelést, egészségügyi határérték megállapítást és mérési eljárás kidolgozást tesz szükségessé. A személyi expozíció határértékét a hőhatás alapján állapították meg. A kísérleti vizsgálat az emberi fej, vagy fej-váll-kéz modellen történik, mely elektromágneses szempontból modellezi a testet. Elektromágneses és hőtechnikai kombinált modell (véráram, stb.) a jelenlegi technikai feltételek mellett nem készíthető el, sőt még szimulációs módszerekkel is gyengén követhető. A testszövetben képződő Joule hő a nagyfrekvenciás villamos tér értékéből vezetik le. A mérés kulcs eleme a mérőszonda, mellyel az említett fizikai modellen belül fel lehet térképezni az elektromágneses teret. A szondával kapcsolatos munkáim során létrejött új eredményeket foglalja össze az 1. Téziscsoport.

A modern mikrogépészeti technikával tömegesen, nagy pontossággal és reprodukcióval állíthatók elő termikus ellenállások. A tömeges, olcsó előállíthatóság találkozik a korszerű automatizáció és szabályozás igényével, ahol szenzorok kiolvasásának a sebessége is fontos szemponttá válik. Ezért érdemes újra megvizsgálni e hagyományos szenzorok miniatűr változatainak a zajhatárolt érzékenységét nagysebességű (szélessávú) működés körülményei közt. Ebben a dolgozatban tipikusan a mikrogépészeti technológiával előállított termikus ellenállások zajhatárolt érzékenységét vizsgáltam meg. Ennél a technikánál a jellemző laterális méretek a  $\mu\text{m}$ ...mm tartományba esnek, a rétegvastagságok pedig a  $\mu\text{m}$  közeli, vagy annál kisebbek. Az értekezésben

(és a vonatkozó publikációkban) a zajegyenértékű jelet számoltam ki egy egyszerű koncentrált paraméterű hőtechnikai helyettesítő kép alapján olyan sáv szélességben, ami a szenzor termikus relaxációs idejének a reciproka, így a működési sebességet és az érzékenységet egyaránt figyelembe vettem. Ez a tárgyalás sok esetben meglepően kompakt képletekhez vezetett. Az ellenállásokban előforduló három fő zajforrást vettem figyelembe: a termikus zajt, az  $1/f$  zajt és a generációs-rekombinációs zajt. Bemutattam az eredményeket néhány konkrét eszközön is, elsősorban az MTA MFA-ban előállított szerkezeteken. Ezen a területen elért új eredményeimet foglalom össze a 2. Téziscsoportban.

A termikus szenzorok egy változata a Seebeck-effektuson alapuló érzékelők, amikor is a hatás a szenzor hőmérsékletváltozásán alapul, de ezt nem az elektromos ellenállás változásának megfigyelésével, hanem a termoelektromos feszültség mérésével detektáljuk. Ezen szenzorok miniatűr változatai a bolométerekhez hasonló mikrogépészeti technikával készíthetők, ugyancsak tömegesen, nagy egyformasággal. Általában számos sorosan kapcsolt termopárból állnak, miniatűr termooszlopokat alkotva. Számos esetben kiválthatják a bolométereket. Felépítésüknél fogva hőmérséklet mérésére nem alkalmasak, de az abszorbeált teljesítmény érzékelésére igen. Kimenő jelük egyenesen arányos az abszorbeált teljesítménnyel mindaddig, amíg a hőtani helyettesítő képük lineárisnak tekinthető. Bár a tapasztalat szerint némi nullapont-eltolódás észlelhető, az értékes jel nem egy nagy előfeszítésre szuperponálódva jelenik meg. Ezek az eszközök nem igényelnek előfeszítést, ezért mentesek az ellenállás fluktuációjából eredő bizonytalanságoktól ( $1/f$  zaj, illetve generációs-rekombinációs zaj). Az elektronikus zaj szempontjából csak a ellenállással kapcsolatos termikus zaj jön szóba. Azt azért érdemes megjegyezni, hogy a félvezetőkből készített termopárok ellenállása általában nagy ( $k\Omega$ ... $M\Omega$  tartomány) ezért a termikus zaj is nagyobb, mint a termikus ellenállásoknál szokásos. Ezzel az eszközzel kapcsolatos új eredményeimet a 3. Téziscsoportban foglalom össze.

## Az alkalmazott módszerek

A térmérő szondákat magam terveztem meg és az összeállítási/szerelési technológiát is én dolgoztam ki. A szerkezetek vastagréteg technológiával készültek, első lépésként poliészter fóliára szitanyomtatással kétfajta ellenálláspaszta és egy ezüstpaszta kontaktus réteget vittek fel. Ez a művelet a BME Elektronikai Technológiák Tanszékén történt Ripka Gábor vezetésével. A további műveletek (diódák beültetése, csatlakozó szerelés, geometria kialakítás, szigetelés, stb.) személyes irányításommal a MTA MFKI-ban, illetve később a MTA MFA-ban. Általában diplomamunkások végezték a manuális munkát a szitanyomtatástól kezdve a kalibrációs mérésekig. Az évek során öt diplomamunka folyt, melyek során egyre tökéletesebb térmérő szondák készültek. A kalibrációs méréseket is magam terveztem meg és természetesen az első néhány alkalommal magam is végeztem el, értékeltem ki.

A termikus ellenállásokra vonatkozó vizsgálatoknál az értekezésben ismerttetett elméleti megfontolásokra és az elektronikus zaj mérésére volt szükség. Számos konkrét adatot, mintát kaptam a MTA MFA-ban ezzel foglalkozó kollegáktól, első sorban Ádám Antalnét és Fürjes Pétert kell itt megemlíteni.

A miniatűr termoszlopokkal kapcsolatos munkák során én terveztem meg az eszközöket, a mérő csipeket, stb. A maszkrajzokat és a technológiát Fürjes Péter dolgozta ki és a MTA MFA Mikrotechnika Osztályán készültek el a csipek. A méréseket, mind az infravörös, mind a mikrohullámú és THz-es tartományban ugyancsak magam terveztem meg, részben végeztem is. A mérések kivitelezésénél Basa Péter segítségét kell megemlíteni. Ezen a területen is számos diák (nyári gyakorlat, önálló labor, PhD, stb.) ismerkedett a témával és végzett manuális munkát.

## Tézisek

### 1. Téziscsoport

A mobil telefonok használata során az emberi testben (elsősorban a fejben és a kézben) elektromágneses energia nyelődik el. Ennek az expozíciónak a mérési módját szabvány írja le, az EN 50361:2001 európai, illetve azzal azonos MSZ EN 50361:2002 magyar szabvány. E szerint az expozíció mérése egy olyan fej formájú üreges műanyag modellben történik, mely az emberi agyvelő komplex dielektromos állandójával azonos dielektromos állandójú folyadékkal van kitöltve. A vizsgálandó mobil készüléket előírt pozíciókban kell a modellhez illeszteni és mérni kell a nagyfrekvenciás villamos tér eloszlását a folyadékon belül. Az elnyelt teljesítmény eloszlását ennek alapján kell számítani a  $P=\sigma E^2$  képlet szerint, ahol  $\sigma$  az elektromos vezetőképesség  $E$  pedig a villamos tér. Az

expozíció határértéke az elnyelt teljesítmény átlagára vonatkozik, mely átlagot 10 g-nyi testszövetet modellező kocka alakú térfogatra kell képezni. Természetesen a dielektromos állandók és a vetőképességek az adott működési frekvencián értendők. A mérés elvégzéséhez olyan térmérő szondára van szükség, mely a polarizációtól függetlenül, izotróp módon érzékel, kisméretű, hogy a téreloszlást jó felbontással lehessen feltérképezni és minimális mértékben befolyásolja a mérendő téreloszlást. Munkám során:

**1.1.** A szabványos mérés céljára új, rugalmas térmérő szondákat szerkesztettem. Ezek jellemzője a vékony poliészter hordozón vastagréteg technológiával kialakított funkcionális szerkezet. Az detektor a korábban kifejlesztett planárisan adalékolt GaAs dióda.

**1.2.** Kidolgoztam a szondák kalibrációját, ennek kapcsán új megoldás a henger alakú tápvonalban végzett izotrópia mérés. Kísérletileg megállapítottam az előállított szondák mérési határait és pontosságát. Ezek megfeleltek a szabvány szerinti SAR mérésre előírt paramétereknek.

**1.3.** A személyi expozíció vizsgálatára szolgáló szonda alapján szélessávú térmérő szondát szerkesztettem az EMC mérőhelyeken való alkalmazás céljára. A készülék kivitelezése konzorciumban történt. Kidolgoztam a kalibrációs eljárást. Ennél a szondánál is megállapítottam a mérési határokat és a pontosságot, ami megfelelt a követelményeknek.

**1.4.** A szonda érzékelő eleme a saját fejlesztésű planárisan adalékolt GaAs dióda, mely előfeszítés nélkül használható mikrohullámú detektorként. Ennek áramvezetési mechanizmusáról az irodalomban elterjedt volt az a nézet, hogy a telítési drift sebesség korlátozza az áramot. A mi számításaink szerint a szabad töltéshordozók diffúziója mindig előbb korlátozza az áramot, mint a drift sebesség maximuma. Az általam kezdeményezett nemzetközi együttműködésben végzett vizsgálat független bizonyítékát adta annak, hogy nem a telítési drift sebesség korlátozza az áramot. A drift sebesség telítődése GaAs-ben annak következménye, hogy a kellően felgyorsult vezetési elektronok átszóródnak egy mellékvölgybe, ahol nagyobb az effektív tömeg, kisebb a mozgékonyosság. (Alkalmas feltételek közt ez vezet a Gunn-domén kialakulásához.) A szóródási folyamat során az elektronikus zaj növekedése

lenne várható. Ezzel szemben a litván együttműködőkkel végzett mérések nem a zaj növekedését, hanem a sörétzaj csökkenését mutatták, ami a diffúziós mechanizmust igazolta. Ebben a munkában a személyes szerepem a kísérlet kezdeményezése, megszervezése és az eredmény interpretálásában való aktív részvétel volt.

## 2. Téziscsoport

A termikus ellenállásokat széles körben használják hőmérséklet mérésre, illetve olyan fizikai mennyiségek érzékelésére, melyek hőmérséklet változássá transzformálhatók. A termikus beágyazottság szerint a beszélhetünk termisztorról, azaz hőmérőről, vagy bolométerről. amikor az elnyelt teljesítmény okozta melegedést észleljük. A bolométereket előnyösen alkalmazzák a különböző elektromágneses sugárzások teljesítményének mérésére. Mivel a termikus ellenállások impedanciája gyakorlatilag tisztán ohmos, ezért szélessávú illesztés valósítható meg, továbbá olyan magas frekvenciájú sugárzások (pl. infravörös, látható, ultraibolya, stb.) is érzékelhetők, melyekre nem állnak rendelkezésre elektronikus eszközök. A mikrogépészeti technikákkal előállított eszközök hőszigetelő membránon kialakított miniatűr fém, illetve félvezető struktúrák. A kis méret miatt az eszközök hőidőállandói kicsinyek, viszonylag nagy (kHz-es) jelfeldolgozási sávszélességet tesznek lehetővé. A nagyobb sávszélesség természetesen az elektronikus zaj növekedésével is jár. Ez a körülmény indokolja az elektronikus zajok eredetének és következményeinek az áttekintését. Mind a termisztor, mind a bolométer alkalmazást tárgyalom egy egyszerű koncentrált paraméterekkel leírt hőtani beágyazás segítségével. Az elektronikus zajok fizikai paraméterei (zajspektrum) alapján az alkalmazás szempontjából értékelhető zajhatárolt érzékenységet (zajegyenértékű jel nagyságát) számítom ki a hőidőállandó reciprokával egyenlő sávszélességben.

**2.1.** Megmutattam, hogy a termisztor esetén a hőmérsékleti relaxáció által meghatározott sávszélességben a termikus zaj okozta bizonytalanság nem függ az elektromos és hőellenállások értékétől.  $\delta T \sim \alpha^{-1} \sqrt{k/C^*}$  ahol  $\alpha$  az ellenállás termikus koefficiense,  $k$  a Boltzmann állandó,  $C^*$  pedig a szenzor hőkapacitása.

**2.2.** Az  $1/f$  zaj esetén javaslatot tettem a divergencia problémájának feloldására. Ily módon az olyan gyakorlati „jósági tényező” szerű paraméter, mint pl. a zajegyenértékű jel meghatározható a fizikai paraméterek alapján. A javaslat lényege, hogy a zaj okozta bizonytalanságot két véges határ,  $f_1$  és  $f_2$  közt integráljuk. Ekkor:

$$\frac{\delta r_{1/f}}{r} \cong \sqrt{c_{1/f} \ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} \quad ,$$

ahol  $\delta r_{1/f}$  az elektromos ellenállás  $1/f$  zaj okozta szórása és  $C_{1/f}$  az  $1/f$  típusú zaj spektrális sűrűségének együtthatója. Hooge törvényt követő zaj esetén:

$$C_{1/f} = \frac{\alpha_H}{nV} \quad ,$$

ahol  $\alpha_H$ ,  $n$  és  $V$  rendre a Hooge-állandót, a szabad töltéshordozó sűrűséget és a térfogatot jelöli. A zaj járuléka a két határfrekvencia viszonyától függ, de mivel ez a függés viszonylag gyenge, a gyakorlatban számolhatunk egy fix viszonytal, pl. a dolgozatban  $10^6$ -ot választottam.

**2.3.** Az exponenciális relaxációval leírható generációs-rekombinációs zaj esetén az ellenállás relatív fluktuációjának spektrális sűrűsége:

$$\frac{\delta r^2}{r^2} = \frac{M\tau_{g-r}}{1+(\omega\tau_{g-r})^2} \quad ,$$

ahol  $\tau_{g-r}$  a generációs-rekombinációs folyamat időállandója. Kimutattam, hogy amennyiben a termikus ellenállást hőmérséklet mérésre használják (termisztor) úgy ez a zajkomponens közelítőleg

$$\delta T_{g-r} \cong \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{M\tau_{g-r}}{\tau}} \quad , \text{ ha } 2\pi\tau_{g-r} < \tau \quad \text{illetve} \quad \delta T_{g-r} \cong \frac{\sqrt{M}}{2\alpha} \quad , \quad \text{ha } 2\pi\tau_{g-r} > \tau$$

bizonytalanságot okoz, attól függően, hogy  $2\pi\tau_{g-r}$  kisebb, illetve nagyobb a hőmérsékleti egyensúly beállítására vonatkozó relaxációs időnél,  $\tau$ -nál.  $\alpha$  az ellenállás termikus koefficiense. Amennyiben a termikus ellenállást bolométerként alkalmazzák, úgy a mért P teljesítmény bizonytalansága:

$$\delta P_{g-r} \cong \frac{1}{\alpha R} \sqrt{\frac{M\tau_{g-r}}{\tau}} \quad \text{ha } 2\pi\tau_{g-r} < \tau \quad , \quad \text{illetve} \quad \delta P_{g-r} \cong \frac{\sqrt{M}}{2R\alpha} \quad , \quad \text{ha } 2\pi\tau_{g-r}$$

Itt  $R$  a termikus ellenállás és a környezete közti hőellenállást jelenti. Amennyiben pedig a bolométerként használt eszközzel a  $\tau$ -nál rövidebb energia impulzust mérnek, úgy:

$$\delta E_{g-r} \cong \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{M\tau_{g-r}C^*}{R}} \quad , \quad \text{ha } 2\pi\tau_{g-r} < \tau \quad , \quad \text{illetve} \quad \delta E_{g-r} \cong C^* \frac{\sqrt{M}}{2\alpha} \quad , \quad \text{ha } 2\pi\tau_{g-r} > \tau \quad ,$$

ahol  $C^*$  az eszköz hőkapacitása.

**2.4.** A konkrét példák alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy a platina és szilícium alapú termikus ellenállások esetén a termikus zajkomponens a legnagyobb a szóban forgó mérettartományba eső eszközök esetén akkor, ha a lehetséges leggyorsabb működéshez tartozó sáv szélességben történik a jel feldolgozása. Az  $1/f$  zaj akkor jelentős, ha a működési sáv szélességet az lehetségesnél jóval kisebbre választjuk.

### 3. Téziscsoport

A termikus ellenállással rokon a termopár. Mikrogépészeti technikával miniatűr termooszlopok (sorba kötött termopárok) készíthetők, melyeket első sorban infravörös sugárzás detektálására használnak. Mivel az eszköz gyakorlatilag áram mentes, az ellenállás fluktuációjával kapcsolatos zajok nem lépnek fel, csupán a termikus zaj korlátozza a felbontást. Ugyanakkor nem nyilvánvaló, hogy a hőmérséklet fluktuációja, ami kis térfogatban jelentős lehet, befolyásolja-e a pontosságot. Számos abszorpció javító bevonatot írtak le és alkalmaznak, ezekkel kapcsolatban bő irodalma van a hő képződésének és eloszlásának a termooszlopok meleg oldalán. A hideg oldal tárgyalása viszont nem található meg az irodalomban.

Az elektromágneses spektrum még kevésbé feltárt és kihasznált területe a THz-es tartomány. Ez felette van a szokásos mikrohullámú elektronikával kezelhető frekvencia sávoknak és alatta a közönséges optikai technikákkal elérhető tartománynak. Általában a  $10^{11}$ .... $10^{13}$  Hz közötti frekvenciákat nevezik THz-es



tartományba esőnek. Várható, hogy amint létrejönnek a THz-es jelek kezelése az egyszerű, olcsó és könnyen alkalmazható eszközök - források és detektorok - akkor az alkalmazások is további lendületet kapnak. Az ismerttől eltérő topológiájú, lineárisan elrendezett termopárokból álló miniatűr termooszlopot javasoltam a THz-es sugárzás detektálására.

**3.1.** Kimutattam, hogy fémes termopárok esetén a hőmérséklet fluktuációja (ú.n. „fononzaj”) és a termikus zaj okozta hőmérséklet mérési bizonytalanságok hányadosa:

$$M \leq \frac{S^2}{L} ,$$

ahol S a Seebeck-együttható, L pedig a Lorenz szám ( $2,44 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$ ). Mivel az ismert S értékek nem haladják meg a  $40 \mu\text{V/K}$ -t, a fononzaj elhanyagolható marad a termikus zaj mellett. Ez az összefüggés elsősorban szobahőmérséklet környékén, vagy a felett igaz a tiszta fémekre, ötvözetek esetén, illetve alacsony hőmérsékleteken a hővezetőképesség és az elektromos vezetőképesség viszonya eltérhet, de az eltérés általában nem nagyobb egy kettes faktornál. Ezért általános érvényűnek tekinthető az a megállapítás, hogy a fononzaj elhanyagolható a termikus zaj mellett.

**3.2.** Félvezetők esetén szobahőmérséklet környékén a hővezetőképesség fononos, nem függ a szabad töltéshordozó koncentrációtól, az elektromos vezetőképességtől. A szilíciumra vonatkozó közelítő összefüggések felhasználásával kimutattam, hogy a szóba jöhető adalékolások esetén fenti hányados:  $M \leq 0,01$ , tehát ennél az anyagnál is a termikus zaj a meghatározó korlátja a felbontásnak.

**3.3.** Távvezeték analógián alapuló tervezési eljárást javasoltam a miniatűr termooszlopokat alkotó termopárok hidegpontjának méretezéséhez.

**3.4.** Új, a termoelektromos hatást kihasználó félvezető eszközt szerkesztettem a THz-es sugárzás detektálására. Kísérletekkel igazoltam az eszköz működési elvét és néhány alaptulajdonságát. A mért érzékenységek versenyképesek a más elven működő THz-es detektorokéval.

### **Az eredmények hasznosítása**

A személyi expozíció vizsgálatára szolgáló térszonda eredetileg a hazai vizsgálatok céljára készült az Országos "Frédéric Joliot-Curie" Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet (OSSKI) részére. Több példányt adtam Dr. Thúróczy György laboratóriumába, szoros együttműködés keretében. További példányok kerültek Angliába a SARTEST laboratóriumba, ahol az általuk fejlesztett pásztázó robottal együtt alkalmazták, illetve adták tovább más laboratóriumoknak. Néhány szonda került németországi egyetemre, Dél-Afrikába és az USA-ba is. Az exportált szondák ára 3000-5000 EURO volt az együttműködés színvonalától függően. Az EMC mérésekhez kifejlesztett szondát a Bonn Magyarország vizsgálati laboratóriumában alkalmazzák.

A bolométerekkel kapcsolatos eredmények elsősorban az Intézetben (MTA MFA, illetve 2012 jan. 1.-óta MTA TTK MFA) számos különböző célra készített, illetve készülő bolométerek konstrukciójában hasznosulnak.

A termikus sugárzás érzékelésére szolgáló miniatűr termooszlopokat az Intézetben a TATEYAMA cég megrendelésére fejlesztettük. Azóta a japán cég a kapott dokumentáció alapján átvette a gyártást. A cég egyik mérnökét kihelyezte Intézetünkbe, ahol több, mint egy évig rendszeres napi konzultációt folytattam vele ebben a témában.

A THz-es szenzor fejlesztése egy jelenleg (2012-ben) futó NKTH-OTKA pályázat tárgya. A végcél a THz-es képalkotás egy sok pixeles detektor mátrixszal. Az itt ismertetett új félvezető eszköz alkalmasabbnak látszik az ilyen integrációra, mint az irodalomban már leírtak. Ahogy arról a 4.5. fejezetben szó volt, érzékenysége sem marad le a publikáltaktól.

## Az értekezés témakörében megjelent publikációk

### Referált nemzetközi folyóiratban megjelent dolgozat:

1. V.V.Tuyen, B.Szentpáli:  
Tunnelling in planar doped barrier diodes  
J. Appl. Phys. 68.N<sup>o</sup>.6. pp. 2824-2828. 15. Sept. 1990
2. B.Szentpáli and V.V. Tuyen:  
Bulk unipolar diodes  
Revue Roumaine des Sciences Techniques série Électrotechnique et Énergétique ,Vol 37, N<sup>o</sup> 3, pp.395-410. 1992
3. J. Liberis, A. Matulionis, P. Salakas, R. Šaltis, L. Dózsa, B. Szentpáli and V. Van Tuyen:  
Microwave Noise in GaAs Planar-Doped Barrier Diodes  
Lithuanian. J. of Phys. 38, No. 2. pp. 203-206, 1998
4. V. Gruzinskis, J. Liberis, A. Matulionis, P. Salakas, E. Starikov, P. Shiktorov, B. Szentpáli and V. Van Tuyen and H.L. Hartnagel:  
Competition of shot noise and hot electron noise in GaAs planar-doped barrier diode  
Applied Physics Letters, Vol. 73., No. 17. pp. 2488-2490, 1998
5. B. Szentpáli:  
Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Phones  
FACTA UNIVERSITATIS (NIS), Series: Electronics and Energetics vol.13. No.1. pp. 51-72, April 2000
6. B. Szentpáli, V.V. Tuyen, G. Constantinidis, M. Lagadas:  
GaAs planar doped barrier diodes  
Materials Science and Engineering B80 pp. 257-261 2001
7. Béla Szentpáli:  
Noise Limitations of the Applications of Miniature Thermal Resistors  
IEEE Sensors Journal Vol. 7, No. 9, pp. 1293-1299, September 2007
8. Béla Szentpáli, István Réti, Ferenc B. Molnár, János Farkasvölgyi, Károly Kazi, Zoltán Mirk, Aurél Sonkoly and Zoltán Horváth:  
Isotropic Broadband E-Field Probe  
*Active and Passive Electronic Components*, vol. 2008, Article ID 816969, 4 pages, doi:10.1155/2008/816969, 2008
9. B. Szentpáli, P. Basa, P. Fürjes, G. Battistig, I. Bársony, K. Károlyi, T. Bercei, V. Rymanov and A. Stöhr:  
Thermopile antennas for detection of millimeter waves  
Applied Physics Letters vol.: 96, 133507, [doi.: 10.1063/1.3374445], 2010
10. Béla Szentpáli, Gábor Matyi, Péter Fürjes, Endre László, Gábor Battistig, István Bársony, Gergely Károlyi, Tibor Bercei:  
Thermopile-Based THz Antenna  
Microsystem Technologies, p.1-8, doi.: 10.1007/s00542-011-1387-7, 2011

## Könyvfejezet:

11. Béla Szentpáli:  
Noise limitations of miniature thermistors and bolometers, chapter in the book:  
Bolometers, ed. Dr. Unil Perera, pp. 53-76, ISBN 979-953-51-0235-9, InTech  
publications 2012  
open access: <http://www.intechopen.com/books/bolometers/noise-limitations-of-miniature-thermistors-and-bolometers>

## Hazai folyóirat:

12. Szentpáli Béla:  
Termisztorok és bolométerek zajhatárolt érzékenysége,  
Híradástechnika, LXII no. 10. pp. 35-42, 2007
13. Szentpáli Béla:  
Mikrohullámú térmérő szondák,  
Híradástechnika, LXII no. 11. pp. 35-42, 2007  
**Pollák-Virág díjjal kitüntetett cikk.**

## Nemzetközi konferencia kiadványa:

14. B.Szentpáli, V.V.Tuyen, M.Németh-Sallay, A.Salokatve, H.Asonen, M.Pessa:  
The planar doped barrier diodes  
Proc. of First International Conf. on Epitaxial Crystal Growth, Budapest, Hungary, 1-7  
April,1990, Crystal Properties and Preparation Vol.32-34  
Pt.II. pp.718-722., Trans. Tech. Publ. ISSN 0252-1067, 1991
15. B.Szentpáli:  
Microwave Field Intensity Meter  
Proc. of MICROWAVES in MEDICINE '91, pp.182-186,  
Beograd, Yugoslavia April 8-11, 1991
16. B.Szentpáli, V.V.Tuyen:  
Rectification in Planar Doped Barrier Diodes  
Proc. of 14-th Annual Semiconductor Conference, CAS 91, pp.269-280  
Sinaia, Romania, October 8-11 1991  
**Meghívott előadás**
17. B.Szentpáli, V. V. Tuyen, M. Németh-Sallay, A. Salokatve, H. Assonen, M. Pessa:  
GaAs planar doped barrier diodes for microwave applications  
SPIE Proc. on International Conference of Microelectronics:  
MICROELECTRONICS '92, SPIE Proc. Ser. Vol. 1783, pp. 100-111, Warsaw, Poland, 21-  
23 September 1992
18. V. V. Tuyen and B.Szentpáli:  
Effect of the diffusion of mobile electrons in strongly asymmetric planar doped barrier  
diodes  
Proc. of the 15-th Annual Semiconductor Conference  
CAS 1992, pp.399-402, Sinaia, Romania, 6-10 October 1992

19. B.Szentpáli, V.V. Tuyen, A. Salokatve, H. Assonen and M. Pessa:  
Design of Planar Doped Barrier Diodes  
Proc. of the Third International Conference on SOLID STATE AND INTEGRATED CIRCUIT TECHNOLOGY (ISBN 7-5053-1892-6/TN.570), pp. 579-581.  
ICSICT'92 Beijing, China , October 18-24, 1992
20. J. Liberis, A. Matulionis, P. Sakalas R. Saltis, L. Dózsa, B. Szentpáli, V.V. Tuyen, H.L. Hartnagel, K. Mutamba, A. Sigurdartottir and A. Vogt:  
Microwave noise in unipolar diodes with nanometric barriers  
Proc. of the 14<sup>th</sup> International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations , (ICNF95) pp. 67-70, Leuven, Belgium, 29 May-3 June , 1997
21. B. Szentpáli, Vo Van Tuyen and György Thúróczy:  
E-Field Probe for Measuring the Exposure Occured by Mobile Phones in Phantoms  
Proc of the CAS 97 (20 th International Semiconductor Conference, pp.373-376, Sinaia, Romania, 7-11 October 1997
22. B. Szentpáli, Tuyen Vo Van:  
Planar Doped Barrier Diodes  
Proc. Of the 9<sup>th</sup> Hungarian-Korean Seminar, ISBN 963 04 8988 0, pp. 209-0218, Budapest, 1997
23. J. Liberis, V. Gruzinskis, A. Matulionis, P. Salakas, R. Saltis, E. Starikov, P. Shiktorov and B. Szentpáli:  
Hot-Electron Noise in GaAs Planar-Doped Barrier Diodes: Experiment and Monte Carlo Simulation  
Proc. of 10<sup>th</sup> International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors pp.72-73, Vilnius Lithuania, August 31-September 2, 1998
24. B. Szentpáli, V.V. Tuyen and Gy. Thúróczy:  
Novel E-Field Probe for Measurements in Phantoms  
Proc. of the 10<sup>th</sup> MICROCOLL, pp.:453-456, Budapest, March 21-24, 1999
25. B. Szentpáli, V.V. Tuyen and Gy. Thúróczy:  
Research Facilities and Proposal for dosimetry: E-field probes for Phantom Measurements  
Forum on Future European Research on Mobile Communications and Health, , p. 106, Bordeaux, France, 19-20 April, 1999
26. B. Szentpáli, V.V. Tuyen and Gy. Thúróczy:  
A Novel E-Field Probe  
Proc. of the 21<sup>th</sup> Annual Meeting of the Bioelectromagnetic Society (BEMS), pp.148-150, Long Beach, California, June 1999
27. B. Szentpáli, V.V. Tuyen and Gy. Thúróczy:  
High-Frequency E-Field Probe  
The 13<sup>th</sup> European Conference on Solid-State Transducers, pp. 269-270, Hague. Netherland, 12-15 September, 1999
28. B. Szentpáli:  
Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Phones  
Proc. of 4<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services, "TELSIKS'99, (IEEE 47) pp. 222-231, Nis, Yugoslavia, 13-15 October 1999

**Plenáris előadás**

29. Béla Szentpáli and György Thúróczy:  
Circular waveguide for calibration of miniature E-field probes  
Proc. of 11<sup>th</sup> MICROCOLL pp. 189-192, Budapest), September 10-11, 2003
30. Béla Szentpáli:  
Noise in solid-state sensors  
Proceedings of SPIE Vol. 5472 Noise and information in Nanoelectronics, Sensors and Standards II, edited by Janusz M. Smulko, Yaroslav Blanter, Mark I. Dykman and Laszlo B. Kish, pp. 131-142, Maspalomas, Gran Canaria, Spain, 26-28 May 2004  
**Meghívott előadás**
31. Béla Szentpáli, Mária Ádám and Tibor Mohácsy:  
Noise in piezoresistive Si pressure sensors  
Proc. Of the SPIE, Vol. 5846 Noise and Information in Nanoelectronics, Sensors and Standards III, ed. J. A. Bergou, J. M. Smulko, M.I. Dykman, L. Wang, pp. 169-179, Austin, Texas, 24-27 May 2005
32. Béla Szentpáli, István Réti, Ferenc B. Molnár, János Farkasvölgyi, Károly Kazi, Zoltán Mirk, Aurél Sonkoly and Zoltán Horváth:  
E-field probe for closed space EMC measurements  
Proc. Of the Mediterranean Microwave Symposium, pp. 89-92, Budapest, 14-18 May 2007
33. Béla Szentpáli, Péter Basa, Péter Fürjes, Gábor Battistig, István Bársony, Gergely Károlyi, Tibor Berceli:  
Millimeter wave detection by thermopile antenna  
Proc. Eurosensors XXIV, Paper No.: B3L-B-4, pp. 1-4, Linz, Austria, September 5-8, 2010
34. B. Szentpáli, P. Basa, P. Fürjes, G. Battistig, I. Bársony:  
Thermopile as THz Detector  
Proc. of the 2nd IEEE International Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications, TERA'2010, pp.: 275-277, Sevastopol, Ukraine 12-14 September 2010
35. Béla Szentpáli, Gábor Matyi, Péter Fürjes, Endre László, Gábor Battistig, István Bársony, Gergely Károlyi, Tibor Berceli:  
THz detection by modified thermopile  
Smart Sensors, Actuators and MEMS, Proc. of SPIE Vol. 8066, 80661R-1, paper no.: 8066-64, 2011
36. Béla Szentpáli, Péter Fürjes, István Bársony:  
THz Detection by Thermopile Antenna  
abstract on The European Future Technologies Conference and Exhibition 2011, (Selection and peer-review under responsibility of FET11 conference organizers and published by Elsevier B.V.) doi:10.1016/j.procs.2011.09.029, Procedia Computer Science 7, 156–157, 2011

## **A csatlakozó szakirodalom legfontosabb közleményei:**

### 1. Téziscsoport

H. Bassen, M. Swicord and J. Abita: A miniature broad-band electric field probe. Annals of the New York Academy of Science, vol. 247. pp. 481-493, 1975.

- T. Schmid, O. Egger and N. Kuster: Automated E-field scanning system for dosimetric assessments, *Trans. On Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, pp. 105-11, 1996
- H. Bassen and G.S. Smith: Electric Field Probes – A Review, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-31, pp.710-718, 1983.
- R.R. Bowman, E.B. Larsen and D.L. Belsher: Eletromagnetic Field Measuring Device, US Patent 3,750,017, 1973

## 2. Téziscsoport

- Hennini M. & Razeghi M.: *Handbook of Infra-red Detection Technologies*, Elsevier, ISBN: 978-1-85617-388-9. 2002.
- Socher E., Degani, O. and Nemirovsky, Y. : Optimal design and noise considerations of CMOS compatible IR thermoelectric sensors. *Sensors and Actuators*, vol. A 71, pp. 107-115. 1998.
- Sh. Kogan: *Electronic noise and fluctuations in solids*, Cambridge University Press, 1996.
- I. Bársony, P. Fürjes, M. Ádám, Cs. Dücső, Zs. Vízváry, J. Zettner and F. Stam: Thermal response of microfilament heaters in gas sensing, *Sensors and Actuators B*, 103, 442-447, 2004
- S.A. Dayeh, D.P. Butler and Z. Çelik-Butler: Micromachined infrared bolometers on flexible polyimide substrates, *Sensors and Actuators A*, 118, 49-56, 2005.

## 3. Téziscsoport

- A. W. van Herwaarden and P M Sarro: Thermal Sensors Based on the Seebeck Effect, *Sensors and Actuators*, 10, pp. 321-346, 1986
- T. Ebel , R. Lenggenhager and H. Baltes: Model of thermoelectric radiation sensors made by CMOS and micromachining, , *Sensors and Actuators A*, 35, pp. 101-106, 1992
- Alberto Roncaglia, Fulvio Mancarella and Gian Carlo Cardinali: CMOS-compatible fabrication of thermopiles with high sensitivity in the 3-5  $\mu\text{m}$  atmospheric window, *Sensors and Actuators B*, 125, pp. 214-223, 2007
- Yun-Shih Lee: *Principles of Terahertz Science and Technology*, ISBN: 978-387-09539-4, Springer, 2009
- Minkevicius L., Tamosiunas V., Kasalynas I., Seliuta D., Valusis G., Lisauskas A., Boppel S., Roskos H.G. and Köhler K., "Terahertz heterodyne imaging with InGaAs-based bow-tie diodes", *Appl. Phys. Lett.* 99, 131101, 2011

## Köszönetnyilvánítás

Ezek a munkák kisebb-nagyobb részben részesültek az alábbi pályázati támogatásokból, melyek vezetője, illetve hazai koordinátora voltam:

- Magyar Tudományos Akadémia AKP 96/2-604 2,3 szám alatti projektje (1996-97)
- EU COPERNICUS „NOISE” projekt, Cp- 941180, (1994-97)
- EU COPERNICUS „MEMSWAVE” projekt, Cp-977131, (1998-2001)  
**Ez a projekt a bekerült a Descartes-díj döntőjébe kiválasztott 10 projekt közé.** (A díjat végül megosztva kapta egy orvosi és egy csillagászati tárgyú projekt)
- Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium fejezeti kezelésű előirányzatának a támogatása (1999)
- OTKA „Félvezető szenzorok elektronikus zajának eredete”, T 037706, (2002-2005)
- OTKA M 036828 sz. műszer beszerzési projekt (2001)
- OTKA M 045352 sz. műszer beszerzési projekt (2004)
- GVOP-3.1.1.-2004-05-0354/3.0 sz. projekt (2004-7)
- Magyar Telekom Nyrt., Fejlesztési igazgatóság, (2008)
- OTKA „TERASTART”, 77843, (2010-12)
- Továbbá az egyik magyar küldött (national representative) voltam 3 egymást követő COST projektben (2001-2011), melyek az elektromágneses expozícióval foglalkoztak. Ezeken a COST találkozókön módon volt a munkám háttéréről részletesen tájékozódni.

Természetes személyek közül igen sokat köszönhetek Ripka Gábornak, aki a szondák előállításával foglalkozó diplomamunkások munkáját irányította. Kezdetben, amikor még nem épültek ki a saját bevizsgáló méréseink, mérési lehetőséget és segítséget kaptam G. Neubauer-től és G. Schmid-től az osztrák Forschungzentrum Seibersdorfban, majd hasonló segítség, illetve tartós együttműködés alakult ki M. Manning-gal az angliai SARTEST Ltd.-nél. A szondák fantom anyagban való független kalibrációját Prof. O. Gandhi volt szíves elvégeztetni tanszékén, a University of Utah-on (USA).



Ahogy a már a 4. fejezetben volt róla szó, a THz-es mérések hazai lehetőség híján a Duisburgi Egyetemen Vitalij Rymanov és Andreas Stöhr közreműködésével, valamint Hamburgban, az egyetemen működő Max-Planck-Intézeti részlegben Matthias Hoffmann segítségével történtek.

A közvetlen kollegák együttműködése nélkül természetesen nem jöhetett volna létre ez a dolgozat. Ők a publikációkban szerepelnek társszerzőként.

Köszönettel tartozom továbbá Riesz Ferencnek a kézirat gondos átnézéséért és értékes tanácsaiért. A dolgozat benyújtásához Battistig Gábor nyújtott értékes technikai segítséget.