

Válasz

Zombory László, a műszaki tudomány doktora bírálata.

Köszönöm a dolgozatom alapos átnézését és véleményezését. A címmel kapcsolatos megjegyzéssel egyetértek, nem új elveken alapuló mérésekről van szó.

A feltett kérdésekkel és az észrevételekkel kapcsolatban:

1. Az anizotrópiáról és a pontosságról.

A jel polarizációja a szondához képest tetszőleges lehet, ez egyrészt következik az előírt mérési pozíciókból (2.2.1. ábra mutatja ennek egy részét), másrészt abból a tényből, hogy a folyadékkal töltött modell fejbe a szondát csak a tetején lévő kis nyíláson keresztül lehet behelyezni, tehát különböző döntésekkel lehet csak bejárni a vizsgált területet.

A hivatkozott EN 50361:200 szabvány 3 dB-es pontosságot kíván meg. Ez a teljesítményt illetően egy kettes faktor, a négyzetes karakterisztika tartományban működő szonda kimenő jele a teljesítménnyel arányos, ezért azon is kettes faktornyi hiba engedhető meg.

A bemérés során a 2.3.5. ábrán bemutatott hengeres csőtapvonalban a szonda mind a három detektorát bemértük, ezek egyformasága nem kiemelkedő, de a 3dB-es követelmény a jónak minősített szondák esetén teljesíthető volt a nélkül, hogy a egyes detektorok jelét korrigálni kellett volna. A szondához készített és együtt szállított elektronika minden detektor jelét először külön-külön erősíti, majd összegzi és tovább erősíti. A teljes erősítés: 200 X. Az egyedi erősítőkben lenne lehetőség a korrekcióra, de nem kellett élni vele. Így az elektronikát nem kellett szondához rendelni.

Az egyes detektorok eltérő érzékenysége abból adódik, hogy a diódák kiszemelése nem tette lehetővé az előzetes válogatást, bemérést. (A mikrohullámú diódáknál válogatással történő típusba sorolás szokásos eljárás.)

A 2.3.9. ábrán mutattam be egy szonda bemérését. Az egyik detektor kb. kétszer érzékenyebb a másik kettőnél, az összegzett jel ingadozása viszont csak $\pm 20\%$ körüli.

Az egyik élnél a ráhajtás okozta aszimmetria kiküszöbölésére volt elképzelés, nevezetesen az, hogy ráhajtás helyett a szondát – legalább is az érzékelő résznél – egy megfelelő átmérőjű és anyagú csőre szorítani a burkoló zsugorcsővel. Ekkor a diódák a szonda külső oldalára kerülnének. Végül is ez bonyolultabb szerelést kívánt volna meg, és a meghibásodási esély is nagyobb. A kívánt 3 dB-s pontosság e nélkül is elérhető volt.

Legyen szabad itt egy a tárgyhoz nem tartozó megjegyzést tennem az ilyen jellegű mérések pontosságáról. Volt szerencsém részt venni Zágrábban a szabad téri mikrohullámú térerősség mérés tárgyában szervezett összemérésen. Ezen kb. két tucat professzionális csapat vett részt, különböző országokból, Ausztráliától Norvégiáig, Magyarországról két csapat is. A mérőműszerek is

változatosak voltak. Teljesen sík mezőn felállított bázisállomás antenna volt a jelforrás és ehhez képest kijelöltek számos geometriailag egyenértékű és különböző mérőhelyet, Minden csapat mért egyenértékű és különböző mérőhelyeken és minden mérőhelyen több csapat is mért. Az egyenértékűnek számító mérések reprodukciója kb. 6 dB lett.

Természetesen a Bode-diagram a helyes megnevezés, ami az időben exponenciális lefutásnak a frekvencia ablakban (doménben) való megfelelője (és nem a direkt Fourier transzformáltja), ahogy azt az opponensi vélemény precízen megfogalmazza.

A detektor diódák valóban a telítéstől igen távoli munkapontban üzemelnek, nem csak a szondában, hanem általában is, hiszen alapvetően „zero-bias” detektorok céljára szolgálnak. A karakterisztikának a nagyáramú tartományban mutatott elhajlása, illetve ennek oka nem befolyásolja a detektorként való működésüket, legfeljebb azzal az előnnyel jár, hogy a nagy jelekkel szemben immunisabbak lesznek. A munka célja a saját fejlesztésű eszközök minél teljesebb megismerése volt.

A zavaró effektusok és a hibabecslés kérdéséről:

A 2.3.5. ábrán látható és fent említett minősítő mérések az alumínium csőtápvonalban történtek, a detektorok jelét Keithley 610 elektrométerrel olvastam le. Itt tapasztaltam 1 mV körüli ingadozást, holott a termikus zaj ennél nagyságrendekkel kisebb. Ezt tulajdonítottam a hálózati áram mágneses terének. Az alumínium cső, elektromosan árnyékol, de a mágneses térrel szemben nem. (Általában az ilyen méréseknél mágneses árnyékolást nem használnak, én sem használtam. Az alacsony frekvenciás mágneses teret csak igen vastag vasburkolattal lehetne hatékonyan csökkenteni, ezért sokszor aktív térkioltást alkalmaznak. Azt azért talán érdemes itt megjegyezni, hogy az utóbbi időben megjelentek olyan anyagok, melyeknek 0,1 mm vastag rétegük 5...7 szeresen csökkenti a sztatikus, vagy alacsony frekvenciás mágneses teret. Ilyen fóliát nem alkalmaztam, más elektromos laboratóriumokban sem láttam ilyen árnyékolást. A jövőben bizonyára létrejön ez a technika is.) A felhasználás során árnyékolatlan körülmények közt mérnek a szondával a Függelékben bemutatott módon (108. old.). A szonda jelét a fentebb említett erősítő után olvassák ki, ennek sávszélessége kb. 10 Hz. A tapasztalt fluktuáció egyes laborokban néha még az 5 mV-ot is elérte, ahogy azt a 30. oldalon írom. Ennek eredetét valóban nem vizsgáltam- jelen sem voltam -, hanem a helyi középhullámú rádióadónak tulajdonítottam. Tettem ezt azon általános tapasztalatok alapján, hogy spektrum analízátoron, vagy akár oszcilloszkópon is árnyékolatlan körülmények közt megjelenik ez a jel, hacsak nincs a bemenet kis ellenállással lezárva.

Most, az opponensi kérdés kapcsán újragondolva a dolgot az is lehet, hogy ott, ahol ezt az extrém nagy fluktuációt tapasztalták a szondát mozgató motorok okozták ezt a zajt.

Összességében a szondát zajszegénynek és jól reprodukálónak jónak tartotta Prof. Om P. Gandhi (Utahi Egyetem) aki talán a legnagyobb szaktekintély ezen mérések területén.

2. A $\Delta f = \frac{m}{\tau}$ összefüggéssel kapcsolatban.

Az elektronikus áramkörök sávszélességét szinuszos jelre vonatkozóan definiálják. Esetünkben a jel exponenciális lecsengését kell követni. Nem találtam tankönyvi leírást arról,

hogy ilyen feladatra milyen sávszélességet szokás használni. A 9.3 Függelékben (114...115 old.) numerikus számításokkal az idő ablakból a frekvencia ablakba és vissza transzformálva megmutattam, hogy az $m=1$ ésszerű választás. Kisebb sávszélesség ($m=0,5$) esetén a lecsengés követése meglehetősen pontatlan ($\pm 15\%$ -os hiba); míg a sávszélesség növelése nem eredményez arányos javulást, de azokkal a hátrányokkal jár, amit az opponensi vélemény is megfogalmaz, növeli a zajt, stb. Az $m=1$ választás esetén az exponenciális görbe követése 5-6 % pontossággal megvalósul, kivéve a már erősen lecsengett állapotot ($t/\tau > 2$), ahol a jel már úgyszólván kicsiny. Ezért használtam az egész fejezetben az $m=1$ értéket.

(Természetesen a Függelékben is a helyes megnevezés a Bode-diagram.)

Az $1/f$ zaj szingularitásával kapcsolatban én sem jutottam új tudományos felismerésre, csupán javaslatot teszek a probléma kezelésére kihasználva a szingularitás gyenge voltát.

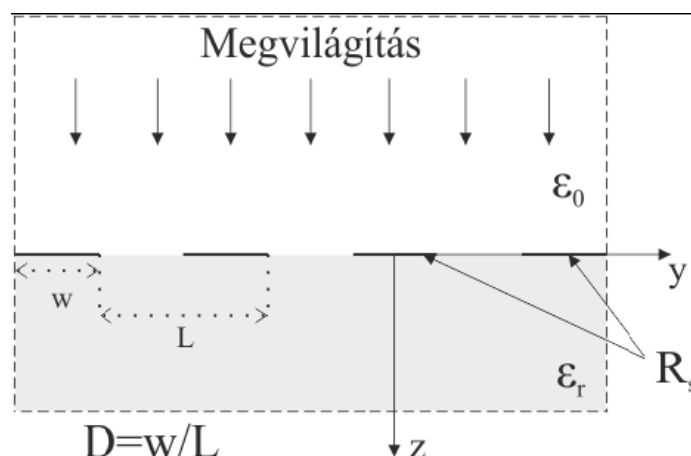
3. A THz érzékelő termooszloppal kapcsolatban.

A dolgozatban ismertetett eszköz saját ötlet, nincs irodalmi megfelelője. Más elveken működő eszközökkel lehet összehasonlítani, ahogy az a dolgozatban néhány esetben tettem is. Kétségtelen tény, hogy léteznek nagyobb érzékenyséű eszközök, ezek közül az egyik (Öjfors és társai.) keskeny sávban lényegesen nagyobb érzékenyséű. Ez egy igen kis gate hosszúságú CMOS technológiával készített tranzisztor. Tudtommal ez az első publikáció az ilyen elven működő eszközről. A szerzők megjegyezték, hogy a mért érzékenység csupán 0,2 %-a a szimuláció alapján vártak, ezt a dolgozatban is idézem. Azóta ennek MOS tranzisztoros érzékelőnek lényeges továbbfejlesztései történtek, jórészt Földesy Péter munkássága nyomán. Az keskeny sávban mért érzékenység a csipre integrált erősítő után jelenleg már eléri a 300 kV/W értéket. Ennek viszont ára van, ugyanis ehhez a MOS tranzisztort 90 nm-es technológiával kell előállítani, ugyanakkor az integrált antenna mérete miatt az elemsűrűség nem lehet nagy. Ilyen finom rajzolatú litográfia csak az u.n. csip-házakban áll rendelkezésre, ott lehet megrendelni. (Ezek az intézmények általában olcsóbb áron dolgoznak az egyetemeknek, mint a profit orientált intézményeknek.) Továbbá számos réteg felvitelére van szükség, mert az antennát el kell árnyékolni a Si hordozótól az abszorpció csökkentése miatt. Nem tisztem ezt az eszközt részleteiben ismertetni. Földesy Pétertől kapott információ szerint a minimális kb. 40 csip elkészíttetése 2 millió forintba került.

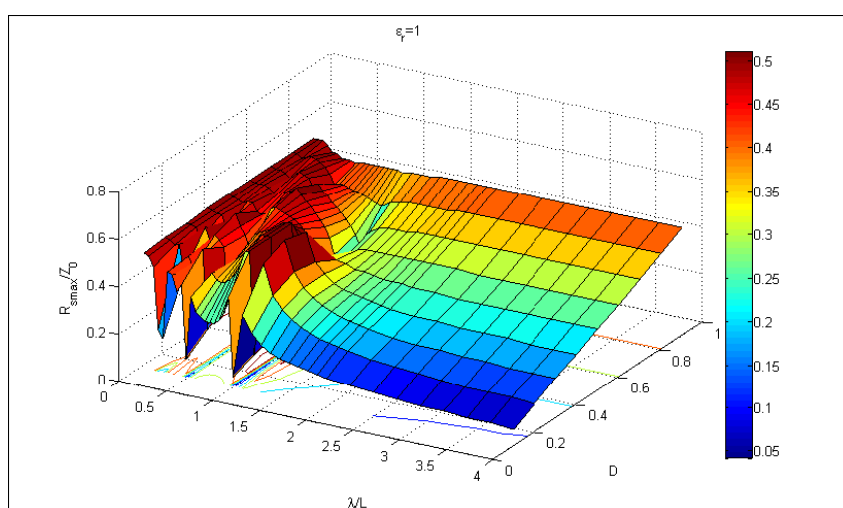
Magam részéről nem hiszem, hogy általában van „legjobb” érzékelő. (Gondoljunk csak arra, hogy hányféle hőmérő van használatban.) Különösen nincs ez így a még csak fejlesztés alatt lévő eszközöknél, mint amilyenek a THz-es tartomány alkatrészei. Nyilván más eszközt használnak majd akkor, ha a hőmérsékleti sugárzás valamelyik THz-es tartományba eső keskeny sávját kell mérni, pl. anyagi jellemző távérzékelése esetén, vagy akkor amikor egy THz-es forrással megvilágított tárgy képét kell leképezni lehetőleg jó felbontásban és real time-ban, pl. biztonsági átvilágításnál.

Az ismertett eszköz érzékenységi tartalékait illetően:

- kb. 5...8-szoros javulást lehetne elérni, ha a termopárok anyaga nem Si, hanem Si:Ge ötvözet lenne. Ezt más (hurok elrendezésű) miniatűr termo-oszlopokon publikált adatok bizonyítják. Ugyanis a Si:Ge ötvözet hővezetőképessége sokkal kisebb.
- A termopár csíkok szaporítása a csíkok számával arányosan növeli a jelet. Azonos felület és fedettség (hőtechnikai paraméter) mellett ez a csíkok vékonyításával érhető el, ekkor viszont az elektromos ellenállás is növekszik. A termikus zajfeszültség viszont csak az ellenállás négyzetgyökével arányos, ezért a zajhatárolt érzékenység a termopárok számának négyzetgyökével nő.
- Az elnyelt teljesítmény szempontjából lényeges a termopárok fajlagos ellenállása, illetve a periodicitásnak a hullámhosszhoz való viszonya. Ezt a kérdést Gombort Tamás vizsgálta meg egy általam vezetett önálló laborfeladat keretében, már az értekezés lezárása után. A feladat az elnyelt teljesítmény meghatározása volt. A vizsgált modell:



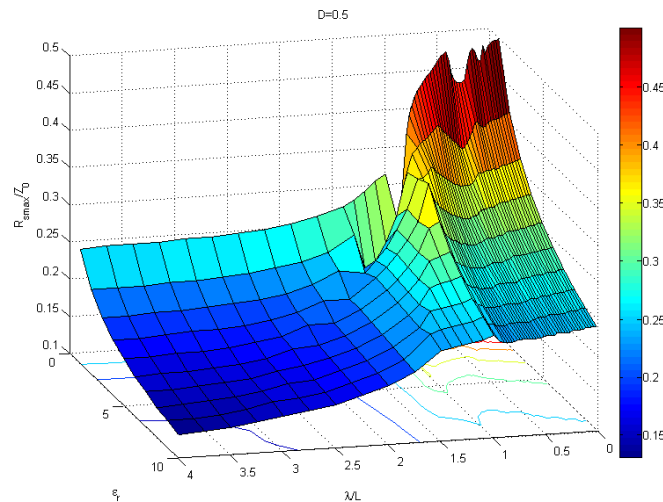
A teljesség igénye nélkül, a dolgozat egyik eredménye:



A maximális elnyelt teljesítményhez tartozó paraméterek akkor, amikor a membrán mindkét oldalán $\epsilon_r = 1$. A jelölések: $R_s = d/\sigma$, a rétegellenállás, ahol d a rétegvastagság és σ a fajlagos vezetőképesség, $Z_0 = 120\pi \Omega$, a szabadtéri hullám impedancia. L és D értelmezése a modell

ábráján. Mivel a rétegvastagságok kisebbek, mint a szkin mélység R_s (más jelölés szerint $R/\square$) értékével számoltunk. Rezonancia figyelhető meg a $\lambda/L = 1$; 0,5 és 0,25 helyeken. . Ezek a hullámhosszak már inkább a távoli infra tartományba esnek. A beeső és elnyelt teljesítmény arányát a színskála jelzi, a maximum 0,5.

Az ϵ_r hatása is vizsgálat tárgyát képezte. Erre vonatkozik a következő hasonló ábra, ahol $D=0,5$, és ϵ_r a változó:



Az említett önálló labor dolgozatban részletes diszkusszió található. Érdekes lenne ezeket a számításokat kísérletileg igazolni.

Természetesen vannak még nyitott kérdések az eszköz működésével. Ilyen például az, hogy félvezetők esetén nem könnyű pontosan megegyező fajlagos ellenállás értékeket beállítani a p és az n oldalon. Kérdés, hogy hogyan befolyásolja az eszköz működését, ha a dipól két szárnya nem ugyanakkora ellenállású?

Még egyszer köszönöm a dolgozatom gondos véleményezését.

Budapest, 2013. október 28.

Szentpáli Béla.