

# MISS és MIST eszközök kutatása

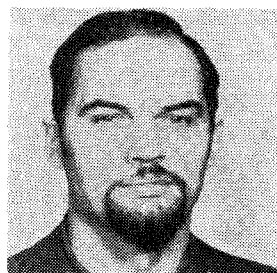
DR. ZÓLÓMY IMRE

BME Elektronikus Eszközök Tanszéke

ARMANDO ADAN

Havannai Műszaki Egyetem

Integrált Áramkörök Intézete

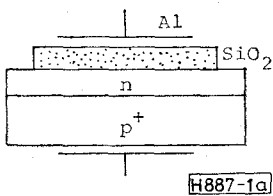


## ÖSSZEFOGLALÁS

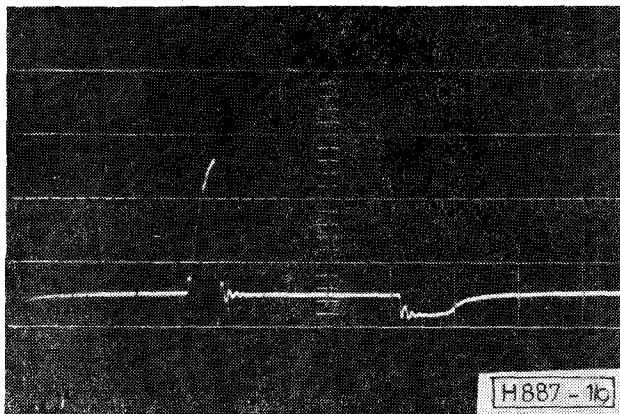
A  $p^+n-i-m$  ( $p^+$ ,  $n$  típusú félvezető, tunnel oxid, fém) struktúrájú, két impedancia-állapotú MISS és MIST eszközök előállítására és fizikai működésük vizsgálata új elvek és jelenségek feltárását eredményezte. Ilyenek voltak az eszközök tranzien্স folyamatok különböző külső áramkörülmények mellett, különböző töltéstárolási effektusok mind a kétkivezetéses MISS, mind a háromkivezetéses MIST esetén. A kapcsolási folyamat befolyásolható fény segítségével is. Továbbfejlesztettük a MISS statikus elméletét is. Az új elmélet több másodlagos effektust is figyelembe vesz és a gyakorlatban tapasztalható jelenségeket jobban leírja. (  $\Delta$  )

1972-ben Yamamoto [1] felfedezte, hogy egy  $p^+n$  — tunnelező szigetelő — fém struktúrával a tirisztorhoz hasonló, negatív differenciális ellenállású karakterisztika nyerhető (1. ábra). Rövidesen az USA-ban is Kroger megjelentette az első publikációt [2, 3], majd Kanadában Simmons és kutatócsoportja [4, 5, 6] több értékes eredményt közölt, Európában Franciaországban alakult kutatócsoport [7, 8] a téma vizsgálatára. A szocialista országokban elsőként a Budapesti Műszaki Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszéke, valamint a Havannai Műszaki Egyetem Integrált Áramkörök Intézete közös kutatócsoportot hozott létre az eszközök tanulmányozására. A Szovjetunióban Machalov és munkatársai [9] folytatnak kutatásokat ezen a területen.

Kutatócsoportunk az első működőképes MISS-



1. ábra. A MISS kapcsolóeszköz felépítése és áramfeszültség karakterisztikája

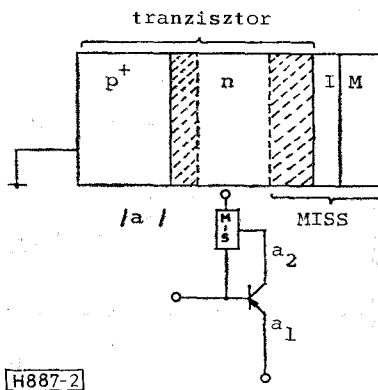


Beérkezett: 1983. VI. 6.

## DR. ZÓLÓMY IMRE

1965-ben szerzett kiegészítő villamosmérnöki oklevelet a Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Karán. 1970-ben félvezető technológia szakmérnöki oklevelet szerzett. 1974-ben védte meg egyetemi doktori disszertációját. 1983-ban kandidátusi fokozatot szerzett. 1965 óta dolgozik a BME Elektronikus Eszközök Tanszékén, előbb tanársegédként, később adjunktusként. Kutatási területei elsősorban a félvezetőeszköz fizikával kapcsolatosak, mint például a félvezető diódák tranzien্স folyamatai, heteroátmenetek, nagy teljesítményű félvezetők és az utóbbi években főleg MISS és MIST eszközök. Foglalkozott ezen kívül még félvezetőeszközök mérés-technikájával, aktív szűrők számítógépes tervezésével, mikroprocesszorokkal és félvezető memóriákkal.

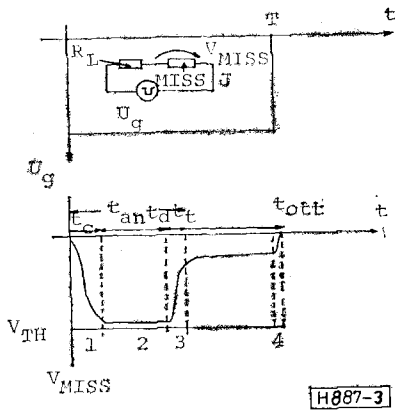
eket Kubában készítette, szívárgó szigetelőként poliszilíciumot alkalmazva. Ezekben az eszközökön végeztünk egyenáramú és impulzusüzemű méréseket, és ennek alapján sikerült az eszköz elméletben több kérdést tisztázni. Később Budapesten készítettünk szilícium-dioxid szigetelőjű eszközöket, amelyek segítségével további új jelenségeket sikerült találni.



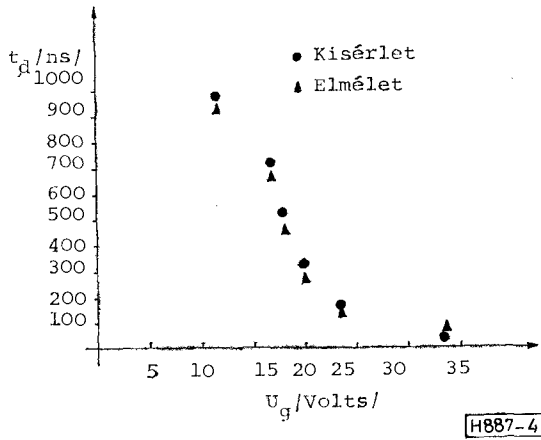
2. ábra. A MISS áramai és két aktív eszközös helyettesítőképe

Az eszközben levő belső visszacsatolás magyarázatára az ún. két aktív eszközös modellt állítottuk fel, mely a 2. ábrán látható [11]. Az eszköz felépíthető egy bipoláris tranzisztorból és egy Shewchun-féle [10] erősítő MIS diódából. A bipoláris tranzisztor emittora a  $p^+$  réteg, bázisa az  $n$  réteg, kollektora pedig az oxid-félvezető határfelületen fellépő kiüritett réteg. Ez éppen úgy össze tudja gyűjteni a  $p^+$  rétegből injektált lyukakat, mint egy valódi, pn átmenetből álló kollektor.

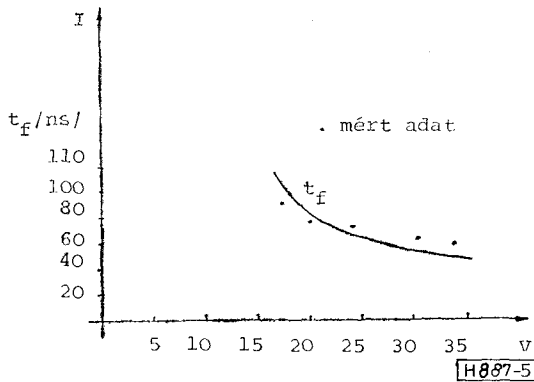
A fém, valamint az  $n$  réteg alkotja a Shewchun-féle erősítő diódát. A felületre jutó lyukak



3. ábra. Kapcsolási transziens lefolyása MISS eszközben



4. ábra. Az inverziós késleltetési idő  $t_d$  függése a meghajtó generátor feszültségétől



5. ábra. A regenerációs visszacsatolási idő függése a meghajtó impulzus amplitúdójától

a felületen inverziós réteget hoznak létre. Ennek hatására megnő az oxidban a térerősség, mivel a fémre a  $p^+$  réteghez képest negatív feszültséget kapcsolunk. A nagy térerősség hatására fémből elektronok tunneleznek az n rétegbe. Ezen elektronáram jobban előfeszíti nyitóirányba a pn átmenetet, így az több lyukat injektál az n rétegbe, mely lyukak tovább növelik a felületi inverziós réteget. Az eszközben tehát egy belső visszacsatolási mechanizmus jön létre, hasonlóan egy tirisztorhoz.

Ha az eszközre egy soros ellenálláson keresztül impulzusfeszültséget kapcsolunk, a 3. ábrán látható fo-

szültség jelenik meg az eszközön [12]. A bekapcsolás három fázisból áll. Az első fázis egy kapacitív hatás eredménye, ezen idő alatt épül fel a felületi kiürített réteg. A második fázis alatt kb. állandó feszültség van az eszközön, és az inverziós réteg kialakulása ezen idő alatt megy végbe. A harmadik fázisban leesik az eszközre jutó feszültség, mivel beindul a megnövekedett oxid-térerő hatására az eszköz belső visszacsatolási mechanizmusa.

A második (inverziós késleltetési idő), valamint a harmadik (regenerációs visszacsatolási idő) fázisra közelítő számítást végeztünk és összehasonlítva az eszközökön mért értékekkel, jó egyezést kaptunk. (4, 5 ábra).

Két bekapcsoló impulzus közötti távolságot csökkentve, azaz rövidítve azon időt, amikor az eszköz kikapcsolt állapotban van, azt tapasztaltuk, hogy bizonyos időkülönbség alatt csökkenni kezdett a bekapcsoláskor az eszközön (a második fázisban) megjelenő maximális feszültség. Ezt a jelenséget az inverziós rétegben, valamint az n réteg semleges részében felhalmozódott lyukak töltéstárolási effektusával magyaráztuk [13].

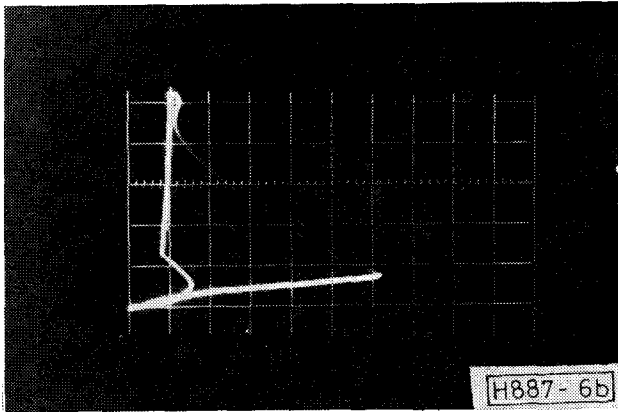
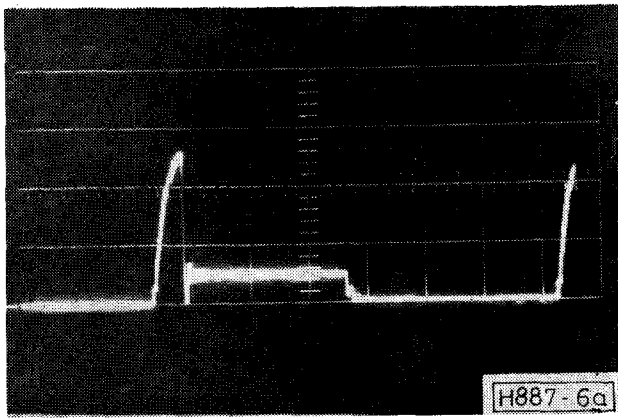
Ha kikapcsoláskor a generátor feszültsége nem zérus, de olyan kicsi nyitóirányú érték, hogy az eszköz statikusan nem tud bekapcsolt állapotban maradni, a kikapcsolás után az eszköz még egy bizonyos ideig bekapcsolt állapotban marad. A 6.a. ábrán látható a MISS-en levő feszültség alakja, impulzusfeszültséget adva rá. Az impulzus megjelenésekor megnő a rá eső feszültség, majd elérve a billenési feszültséget, bebillen az eszköz a kisimpedanciás állapotba, a feszültség lecsökken. Az impulzus megszűnésekor ez a feszültség nullára csökken. A 6.b. ábra esetén kikapcsoláskor maradt a MISS-en feszültség, mely azonban nem elegendő nagy ahhoz, hogy a soros ellenállást is figyelembe véve, bekapcsolt állapotban maradjon. Ennek ellenére az eszköz egy ideig még bekapcsolt állapotban marad (a feszültség ekkor minimális rajta) majd kikapcsol, miközben a rajta levő feszültség megemelkedik (6. ábra). Ez a tárolási idő az inverziós réteg töltésének tehetetlenségével magyarázható. A két aktív eszközös modell alapján meghatározható ezen jelenség segítségével az áramerősítési tényezők áramfüggése [14].

Az eszköz küszöbfeszültsége megvilágítás hatására csökken. Ha az eszközre impulzusfeszültséget kapcsolunk, az első és a harmadik fázis hossza gyakorlatilag nem változik, a második fázis (inverziós késleltetési idő) nagymértékben lecsökken (7. ábra). A jelenség magyarázata az, hogy a megvilágítás elősegíti az inverziós réteg kialakulását a szigetelő-félvezető határátmenetben, így a második fázis előbb véget ér, mivel ez egy kritikus töltés elérésekor következik be [15].

Vizsgáltuk a pn átmenet nélküli, poliszilícium szigetelőjű MIS dióda feszültségimpulzus, valamint konstans megvilágítás mellett fellépő áramtransziensét is, és érdekes új hullámalakot tapasztaltunk [16].

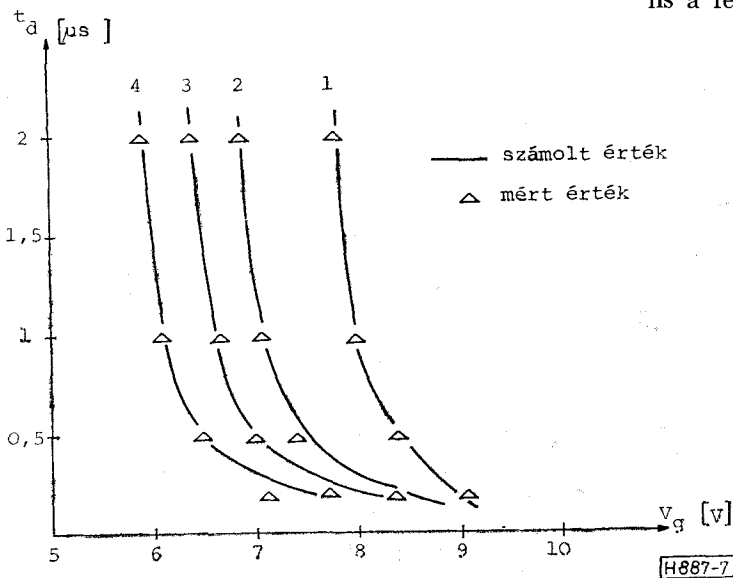
Az Elektronikus Eszközök Tanszéken készült  $n^+ - p - i - n$  felépítésű MISS-ek közül néhányánál mindkét irányban negatív ellenállást tapasztaltunk [17].

A kísérleti munka mellett továbbfejlesztettük a MISS egyenáramú elméletét is. Az eszköz  $I - V$  ka-



6. ábra. Töltéstárolási jelenség a MISS dióda kikapcsolásánál, a) kikapcsoláskor a generátorfeszültség zérus lesz, b) kikapcsoláskor a generátorfeszültség zérusnál nagyobb értékre csökken

rakterisztikáját kvantitatív módon először Habib és Simmons [6] határozta meg. Habár ezen szerzőpáros nagy érdeme a kvantitatív elmélet megalkotása, elméletük több szempontból nem írja le kielégítően a gyakorlatban tapasztalt tendenciákat. Az elmélet az eszköz küszöbfeszültségére az átszűrési feszültség-



7. ábra. Az inverziós késleltetési idő csökkenése megvilágítás hatására. (1) sötétben, (2)  $\varnothing = 7000$  lux megvilágításnál, (3)  $\varnothing = 14000$  lux, (4)  $\varnothing = 21000$  lux

gel azonos értéket ad. A gyakorlatban mért küszöbfeszültségek azonban mindig kisebbek az átszűrési feszültségnél. Vastag oxidoknál rendkívül kicsi tartóáramok adódnak az elméletből, ezt szintén nem sikerült elérni a valóságban.  $V_{th}$ -t az elmélet hőmérséklet-függetlennek adja, ugyanakkor a gyakorlatban megfigyeltek mind a hőmérséklettel enyhén emelkedő, mind erőteljesen csökkenő küszöbfeszültséget.

A három kivezetős MISS (MIST) esetén az elmélet szerint az eszköz rendkívül érzékeny a gate-áramra (a gate az n réteg kivezetése), a tartóáram mintegy ötezred része elegendő ahhoz, hogy a küszöbfeszültség a tartófeszültség értékére csökkenjen. A gyakorlatban ez az arány azonban 0,5 és 10 közé esik.

A fenti ellentmondások kiküszöbölésére az elmélet továbbfejlesztése az alábbi irányokba történt [18]:

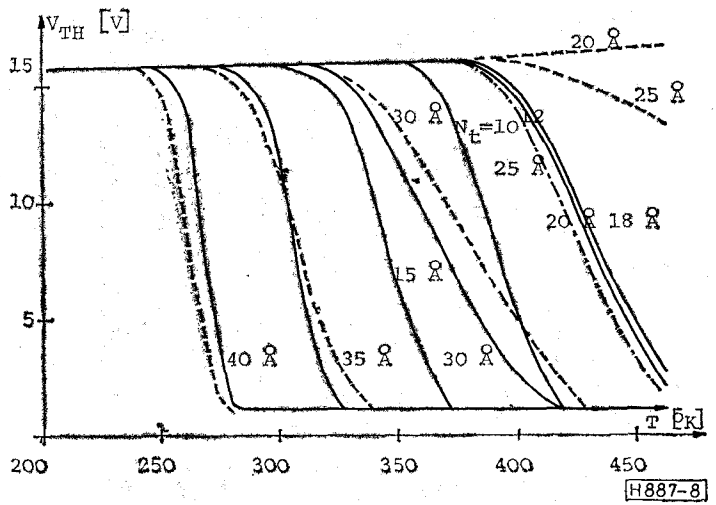
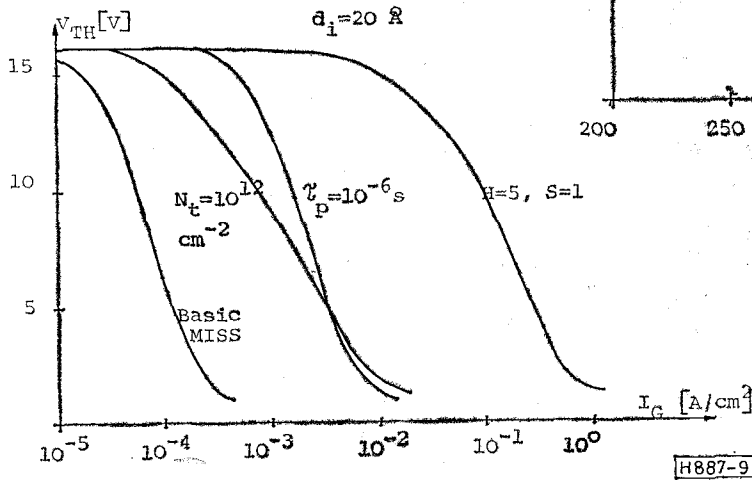
Figyelembe vettük a felületi állapotok hatását, a tunneloxid inhomogén vastagságát, valamint kétdimenziós effektusokat (a tunneloxid területe lényegesen kisebb, mint a pn átmenet kinyitott részének területe). Ezen effektusok megmagyarázzák, hogy vastagabb oxidok esetén miért nem csökken le nagymértékben a tartóáram értéke (ehhez valamennyi jelenség hozzájárul, de leglényegesebb a tunneloxid vastagsága). A gateáram iránti érzéketlenséget jelentősen növelik a felületi állapotok, de legnagyobb hatásuk a kétdimenziós effektusoknak van. A 9. ábra  $V_{th}$  függését mutatja a gateáramtól. A kétdimenziós effektusok görbéje mellett  $H=5$ ,  $S=1$  jelentése, hogy a tunneloxid területe téglalap alakú, melynek hossza az n réteg vastagságának ötszöröse, szélessége viszont azonos az n réteg vastagságával.

Az eszköz világviszonylatban még az intenzív kutatás stádiumában van, néhány alkalmazási lehetőségre azonban máris történtek javaslatok és ezeket demonstrálták is. Az eszköz fényérzékenységét kihasználva lehetséges fotokapcsolót, illetve a fototirisztnak megfelelő funkciót megvalósítani vele. A két impedanciás állapotot (kis és nagyimpedanciás) kihasználva megvalósítható az egy eszközös statikus RAM cella. A MISS technológiája teljesen kompatibilis a félvezető alapú integrált áramkörök technológiájával, ezért az eszköz könnyen integrálható a VLSI áramkörökbe.

Ha két MISS-t valósítunk meg egy közös alapon egymáshoz közel, akkor az egyik eszköz küszöbfeszültsége függ attól, hogy a másik eszköz bekapcsolt vagy kikapcsolt állapotban van. Ezt a jelenséget felhasználva készíthetünk CCD-hez hasonló léptető regisztert, mely azonban a CCD-kel ellentétben statikus működésű, nem igényel frissítést és belőle tetszőlegesen hosszú lánc építhető, mivel a jel mind-egyik fokozatban regenerálódik.

A MISS eszközök optimalizált méretezése ma még nem megoldott. Probléma aránylag kis sebességük is, továbbá a méretek csökkentésekor újabb nehézségek keletkeznek. További intenzív kutatómunkára van tehát szükség ahhoz, hogy az eszköz széles körű felhasználásra kerülhessen.

8. ábra. A MISS küszöbfeszültségének (billelési feszültségének,  $V_{TH}$ ) függése a hőmérséklettől, paraméter a tunnel-oxid vastagsága. Folytonos vonal: egydimenziós esetben, szaggatott vonal: kétdimenziós hatások figyelembevételével, pont-vonal: felületi állapotok hatása esetén



9. ábra. A MIST (három kivezetésű MISS) küszöbfeszültségének változása a gateáram hatására egydimenziós esetben, felületi állapotok figyelembevételével, lecsökkent kisebbségi töltéshordozó élettartam esetén, valamint kétdimenziós effektusok hatására, ezen utóbbi esetben a tunnel-oxid hossza az ötszöröse, a szélessége pedig meg egyezik az n típusú epitaxiális réteg vastagságával

#### IRODALOM

- [1] T. Yamamoto, M. Morimoto: „Thin-MIS-structure Si negative resistance diode.” *Applied Physics Letters* 20. k. 269–270. o. (1972).
- [2] H. Kroger, H. A. R. Wegener: „Bistable impedance states in MIS structures through controlled inversion.” *Applied Physics Letters* 23. k. 397–399. o. (1973).
- [3] H. Kroger, H. A. R. Wegener: „Steady-state characteristics of three terminal inversion-controlled switches.” *Solid-State Electronics* 21. k. 655–661. o. (1978).
- [4] J. G. Simmons, A. El-Badry: „Theory of switching in metal (semi-insulator) n-p<sup>+</sup> silicon devices.” *Solid-State Electronics* 20. k. 955–961. o. (1977).
- [5] A. El-Badry, J. G. Simmons: „Experimental studies of switching in metal semi-insulating n-p<sup>+</sup> silicon devices.” *Solid-State Electronics* 20. k. 963–966. o. (1977).
- [6] S. E. D. Habib, J. G. Simmons: „Theory of switching in p-n-insulator(tunnel)-metal devices.” *Solid-State Electronics* 22. k. 181–192. o. (1979).
- [7] J. Buxo, A. E. Owen, G. Sarabayrouse, J. P. Sebas: „The characterization of metal-thin insulator-n-p<sup>+</sup> silicon switching devices.” *Revue de Physique Appliquée* 13. k. 767–770. o. (1978).
- [8] G. Sarabayrouse, J. Buxo, J. P. Sebas, A. Essaid: „Switching properties of inversion-controlled metal-thin insulator-Si-n-Si p<sup>+</sup> devices.” *IEE Proceedings - I. Solid State and Electron Devices* 128. k. Pt. I. 53–57. o. (1981).
- [9] B. A. Machalov, V. J. Pokaljakin, G. V. Sztepanov: „O perekljucsennyi toka v sztrukture metall-tunnelno-prozraecnij szloj dviuokszii kremnyija-pn-perehod.” *Mikroelektronika* 9. k. 241–248. o. (1980).
- [10] M. A. Green, J. Shewchun: „Current multiplication in metalinsulator-semiconductor (MIS) tunnel diodes.” *Solid-State Electronics* 17. k. 349–365. o. (1974).
- [11] A. Adán, I. Zólyomy: „A proposed model of MISS composed of two active devices.” *Solid-State Electronics* 23. k. 449–456. o. (1980).
- [12] I. Zólyomy, A. Adán: „Switching behaviour of MISS diodes.” *Solid-State Electronics* 24. k. 19–23. o. (1981).
- [13] A. Adán, I. Zólyomy: „Charge storage effects in MISS diodes.” *Physica Status Solidi (a)* 57. k. 113–115. o. (1980).
- [14] I. Zólyomy: „The effect of non-zero switch-off voltage upon the transient of MISS diodes.” *Physica Status Solidi (a)* 67. k. 69–77. o. (1981).
- [15] I. Zólyomy: „Switching transient of MISS diodes influenced by illumination.” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering* 25. k. 3. sz. 219–222. o. (1981).
- [16] I. Zólyomy, A. Adán: „Current transients in illuminated polysilicon MIS diodes.” *Physica Status Solidi (a)* 63. k. K179–K181. o. (1981).
- [17] I. Zólyomy: „New phenomena in MISS devices.” *Mikroelektronika* '82. Siófok, 1982. máj. 5–7.
- [18] Zólyomy Imre: „Új, fém-tunnelező szigetelő-félvezető felépítésű kapcsolóeszköz, a MISS” – kandidátusi értekezés Budapest, 1982.
- [19] I. Zólyomy: „Diffusion-isolated MISS devices.” *Physica Status Solidi (a)* 73. k. K249–K251 o. (1982).
- [20] I. Zólyomy: „Extended theory of MISS, MIST and OMIST devices.” *ESSDERC '82 München* 1982. szept. 13–16.
- [21] I. Zólyomy: „A combined (punch-through and avalanche) theory of MISS devices and some design considerations.” *ESSDERC '82 München* 1982. szept. 13–16.
- [22] Zólyomy Imre: „MISS és MIST eszközökhöz szükséges extrém vékony, tunnelező oxidréteg készítése és vizsgálata.” *A BME Jubileumi Tudományos Ülésszaka, fennállásának 200. évfordulója alkalmából (Központi oktatási egységek)* 1983. márc. 29–30.
- [23] Zólyomy Imre: „MIST eszközök tranzien működése.” *A BME Jubileumi Tudományos Ülésszaka, fennállásának 200. évfordulója alkalmából (Villamoskar ülésszaka)* 1983. ápr. 19–20.
- [24] I. Zólyomy: „Modified theory of MISS, MIST and OMIST devices.” *Solid-State Electronics* (megjelenés alatt).