

# Integrált áramköri elemek fizikai modellezése áramkörszimulációs program segítségével

ETO 621.3.049.77.001.57

A különféle félvezető eszközök és struktúrák működésének vizsgálata

- a töltéshordozók transzportját leíró egyenletek,
- a töltéshordozók megmaradását kifejező összefüggések, valamint
- az elektromos erőtér általános sajátságait meghatározó Maxwell-egyenletek

által alkotott parciális differenciálegyenlet-rendszernek az adalékolási viszonyoktól függő közegre, a félvezető eszköz geometriai adataitól, valamint a külső (elektromos, optikai, termikus stb.) gerjesztésektől függő kezdeti és peremfeltételekkel való megoldását kívánja meg.

## 1. Bevezetés

A gyakorlati szempontból használatos struktúrákra azok bonyolultsága, a figyelembe veendő anyagjellemzők télerősségektől, töltéskoncentrációktól stb. való függése miatt az analitikus megoldás csak rendkívüli egyszerűsítések mellett lehetséges. Elsősorban numerikus megoldási módszereknek van létjogosultsága, azonban még itt is egyszerűsítő módszereket kell alkalmaznunk, mert a fent vázolt probléma számítógépi módszerekkel való teljes megoldása még napjaink nagy teljesítményű számítógépeinek rendkívüli teljesítőképességét is meghaladja. A differenciálegyenletek differenciaegyenletekké való áttranszformálása során kijelölendő térbeli pontok száma — a diszkrétizálás finomságától és módszerétől függően — a tízezer és millió nagyságrendi intervallumba esik, és a rendszer megoldása elméleti és gyakorlati problémák egész sorozatát veti fel, kezdve a megoldás egzisztenciájának és unicitásának kérdéséig az egyes közegjellemzők nemlinearitásából származó extrém számítási teljesítményigényig. A probléma megoldására két út mutatkozott:

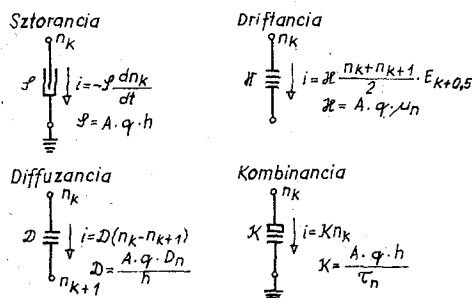
1. egyszerűsítés a *dimenziószám csökkentésével*  
Jó eredmények érhetők el egydimenziós modellek segítségével anélkül, hogy a számítási igény túlságosan nagy lenne. Hátrány azonban, hogy számos, gyakorlati szempontból jelentős probléma ezután nem vizsgálható;
2. *regionális approximáció alkalmazása*: a vizsgált struktúra egyes részeit eltérő, csak az adott rész

fontos sajátságait leíró egyszerűbb összefüggésekkel modellezzük, az egyes részeket pedig érintkezési felületükön „belső határfeltételekkel” illesztjük egymáshoz.

## 2. Regionális approximáció

A regionális approximáció alapproblémája a rézszekre — régiókra — bontás és az azok közötti belső határfeltételek helyes megfogalmazása. Bár ez a feladat tisztán matematikai problémaként is — a félvezető eszköztől teljesen elvonatkoztatva — megoldható, jelentős könnyítést ad az eszköz működésének és a félvezetőkben lejátszódó fizikai folyamatoknak az ismerete mind a régiókra bontás, mind pedig a belső határfeltételek meghatározásában. Ez a felismerés már a félvezetők hőskorában, 1958-ban megtörtént, amikor Linvill publikálta az azóta eltelt időben már róla elnevezett ún. Linvill-modellt [1]. Elgondolásának lényege az volt, hogy már a diszkrétizálás során helyezzük előtérbe a félvezető fizikai folyamatokból levonható következtetéseket. Ennek érdekében új áramköri elemeket (1. ábra) vezetett be (sztorancia, driftancia, diffuzancia, kombinancia).

Ezen különleges elemek bevezetése — melyek a Kirchoff-egyenleteken alapuló hálózatmegoldási módszerekkel nem voltak kezelhetők — Linvill ötletének gyakorlati elterjedését megakadályozták ugyan, azonban rendkívüli mértékben gondolatébresztőnek bizonyultak a félvezető eszközök modellezése területén. Az 1970-es évek elején felismertük, hogy Linvill ötletének olyan módosítása, amely a diszkrétizáció során „közönséges” áramköri elemeket alkalmaz, rendkívüli lehetőségeket biztosít félvezető eszközök és integrált áramköri elemek modellezésekor.



[H 694-TK1]

### 3. Közegmodellek

A BME Elektronikus Eszközök Tanszékén az 1960-as évek végén kidolgozásra került a TRANZ-TRAN nemlineáris áramköranalízis program, amely elsődlegesen integrált áramkört tartalmazó hálózatok vizsgálatára készült. A program modellkészletének megalkotásakor nagy gondot fordítottunk arra, hogy a modellek az egyes félvezető eszközök működését oly módon írják le, hogy

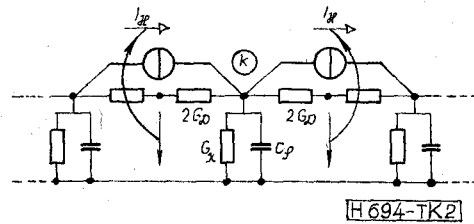
a) a leíró egyenletek a kapcsolási paraméterek közötti összefüggést a félvezető eszközök fizikai elméletéből származó összefüggésekkel írják le; kerültük olyan összefüggések alkalmazását, amelyek az egyes, mérésrel meghatározott karakterisztikáknak — matematikailag könnyen kezelhető, azonban fizikailag nem kellőképpen megalapozott — függvényekkel való közelítésén alapulnak;

b) a leíró egyenletek kiválasztásakor a különféle másodlagos hatásokat két szempontból elemeztük és vettük figyelembe: egyrészt azokat a hatásokat, amelyeknek erőteljes fellépése a vizsgálandó áramkör rendeltetésszerű működését gyakorlatilag lehetlenné teszi, elsősorban hibajelzésekkel vettük számításba, másrészt a tervezőmérnök számára fontos másodlagos hatásokat megadó összefüggéseket szerepeltettük a modellegyenletekben, azonban olyan korlátozott pontosságú leírásokra törekedtünk, amely aránylag nagyméretű hálózatok (pl. műveleti erősítők) vizsgálatakor gazdaságos futási időket eredményez.

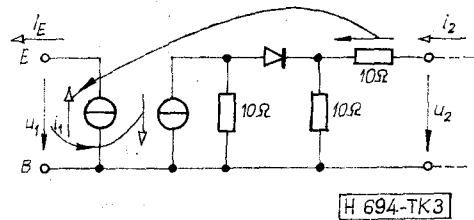
Az előzőekben ismertetett szempontok lehetővé tették azt, hogy az 1970-es évek elején a TRANZ-TRAN programrendszer bővíthessük az integrált áramkörökben igen fontos termoelektromos effektusok egzakt számításba vételével. A módszer, amely a termodinamika általános transzportelméletén (Onsager-elmélet) alapul, algoritmikus nehézségek nélkül, inherens módon beépíthető volt a program továbbfejlesztett változatába [2, 3]. Ez a módszer lehetővé tette — ismereteink szerint nemzetközi viszonylatban is először — olyan kombinált elektromos-termikus transzportjelenségek számítógépi modellezését, mint pl. a  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Peltier-hűtőelem közegmodellel alapuló hőeloszlásának, hűtőhatásának, továbbá kapcsolási hőtranzienének vizsgálatát. A TRANZ-TRAN áramköranalízis programban felhasznált, Linvill ötletének az előző pontban említett módosításán alapuló közegmodell struktúrájáról és az eredményekről már egy korábbi alkalommal részletesen beszámoltunk [4, 5]. E vizsgálatok egy alapjaiban is újszerű termikus funkcionális elem, a termikus szorzó elméletének kidolgozásához, majd megvalósításához vezettek [6].

### 4. Bipoláris eszközök modellezése

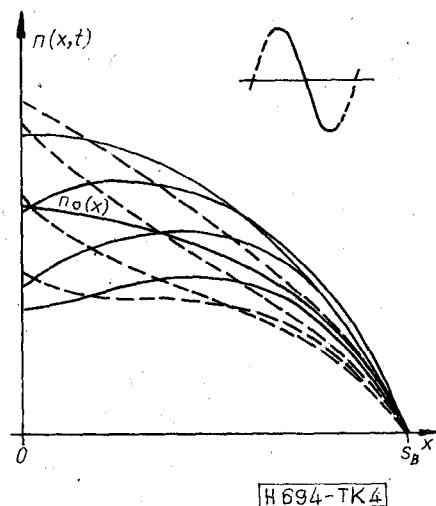
Bipoláris tranzisztor működését vizsgáltuk Linvill módosított módszerével [7, 8]. A bázisstartományban a diffuzanciát és kombinanciát ellenállítás, a sztoranciát kapacitás- és a driftanciát vezérelt áramgenerátor helyettesítette (2. ábra). A bázist határoló p-n átmeneteket az eredeti Linvill-modell exponen-



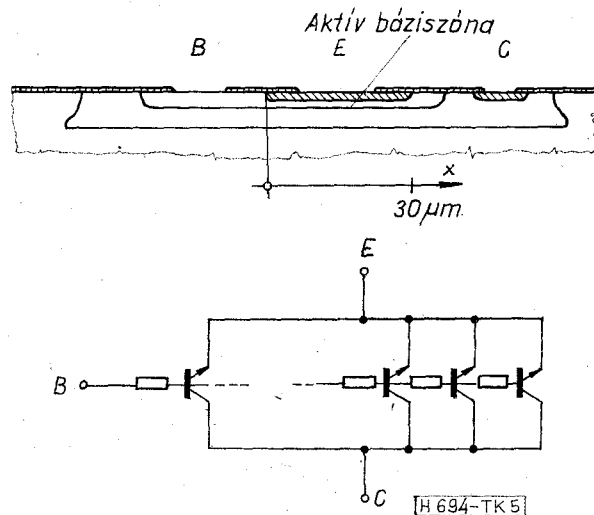
2. ábra. Bázisstartomány modellezése



3. ábra. A bázisstartományt határoló átmenetek modellezése



4. ábra. A Linvill-módszeren alapuló regionális approximációból számított kisebbségi töltéshordozó-eloszlás szinuszos gerjesztés esetén, különböző időpillanatokban

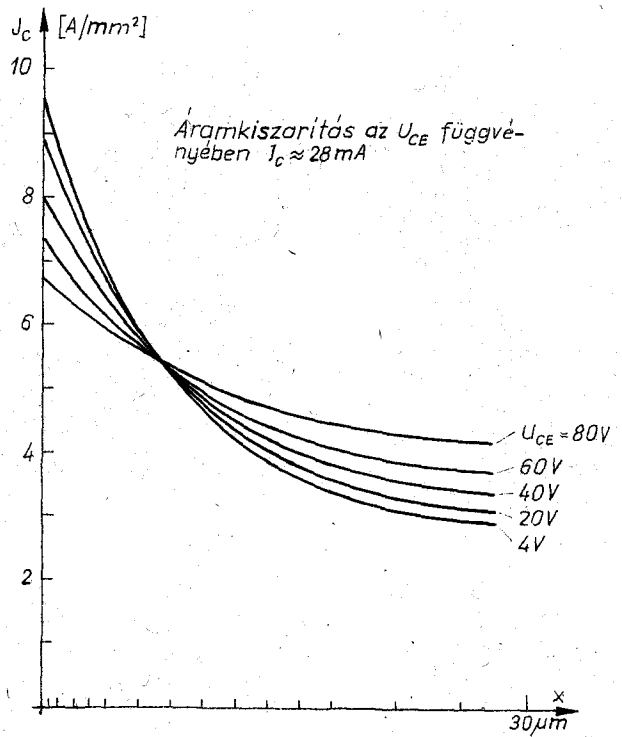


5. ábra. Tranzisztor modellezése az áramkiszorítási jelenség vizsgálatához

ciális jellegű feszültség-hordozókoncentráció transzformátora helyett diódás-vezérelt áramgenerátoros hálózat modellezte (3. ábra). A módszer alkalmazásának reprezentatív eredményeként a 4. ábrán inhomogén bázisú tranzisztor bázisában levő kisebbségi töltéshordozó koncentráció hely és idő szerinti eloszlását mutatjuk be.

A módszert — más szerzőkkel közel egyidőben — kiterjesztettük oly módon, hogy a diszkrétizálás során már nemcsak a hálózatelmélet klasszikus alapelemeit (ellenállás, kapacitás, feszültség- és áramgenerátorok), hanem összetettebb félvezető elemeit (pl. bipoláris tranzisztor) is alkalmazzuk.

Integrált áramköri tranzisztorokban fontos zavaró hatásként lép fel az áramkiszorítás jelensége: a többségi töltéshordozók rekombinációt fedező árama a báziskivezetés felé folyó, az emittertől a kollektor felé haladó „hasznos” kisebbségi töltéshordozó-áramlásra merőleges áramlása feszültségesést idéz elő a bázisban. Ez lecsökkenti az emittér és bázis közötti nyitófeszültséget, amelytől az injektált kisebbségi töltéshordozó mennyiség exponenciálisan függ. Ennek következtében a tranzisztor összáramának jelentős része az emittérnek a báziskivezetéshez közeli részein folyik, az emittér távolabbi részei pedig már jóformán csak azokban a hatásokban játszanak szerepet, amelyek a tranzisztor működését kedvezőtlenül befolyásolják. Az 5. ábra a diszkrétizálást, a 6. ábra pedig az emittéráram hely szerinti eloszlását szemlélteti. A vizsgálat során nyert eredeti eredményt láthatunk a 7. ábrán. Kihasználva a TRANZ-TRAN programrendszer termikus-elektromos jelenségek vizsgálatára való alkalmasságát, kimutattuk, hogy a bázis egyes részei közötti hőcsatolás folytán az áramsűrűség eloszlásában mutatkozó egyenlőtlenség a kollektorfeszültség növelésével csökken. Ez a megállapítás elsősorban nagy-



H 694-TK 7

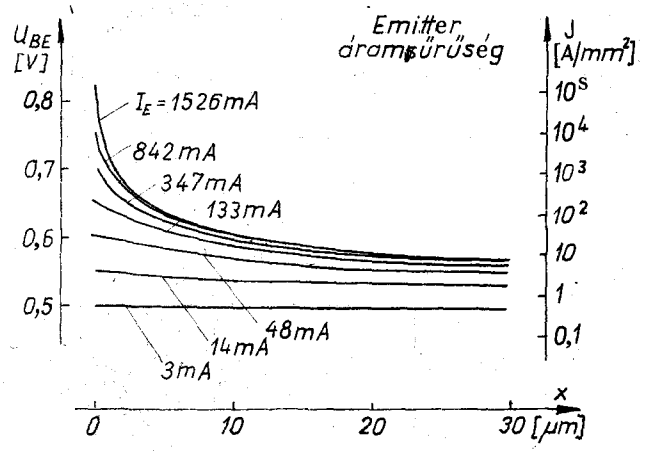
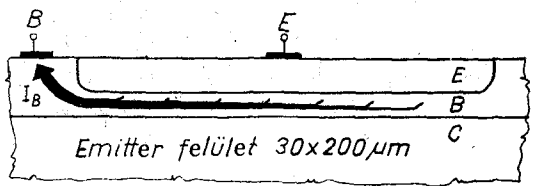
7. ábra. Az emittér áramsűrűség áramkiszorítás következtében kialakuló eloszlása a bázis egyes részei közötti termikus csatolás figyelembevételével

teljesítményű tranzisztorok konstruálásakor használható.

Az LSI integrált áramköri technika egyik új, nagy jelentőségű elenie az I<sup>2</sup>L áramkör. A korábbiakban említett módszer alapján több, különböző bonyolultságú modellt dolgoztunk ki I<sup>2</sup>L elemek modellezésére [9], melyekből a legegyszerűbbet a 8. ábra szemlélteti. A modell egyszerűsége mellett megfelelő pontossággal leírja az I<sup>2</sup>L elem működését, emellett főbb paramétereinek meghatározása is egyszerű. A 9. ábra a modellel nyert transzfer karakterisztikát mutatja be (különböző hőmérsékleteken), a 10. ábra pedig azt szemlélteti, hogy az I<sup>2</sup>L kapu transzfer karakterisztikája hogyan függ az n-n<sup>+</sup> átmenet rekombinációs sebességétől.

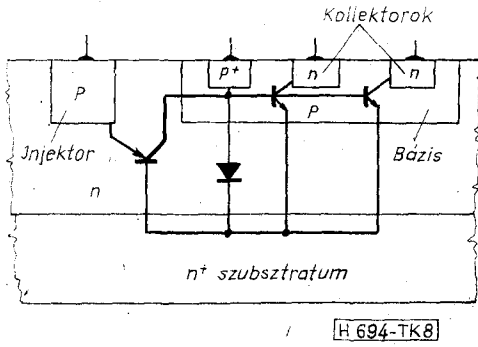
5. MOS eszközök modellezése

MOS tranzisztorok fizikailag megalapozott, egyszerű, a bipoláris tranzisztoroknál alkalmazott Ebers—Moll modellel azonos topológiájú modelljét dolgoztuk ki, és építettük be a TRANZ-TRAN áramköranalízis-programba [10, 11, 12]. A modellt később bővítettük a hőmérsékleti és szubsztrátum hatások figyelembevételére szolgáló összefüggésekkel [13]. Ezen túlmenően — az itt szerzett tapasztalatok felhasználásával — funkcionális modell kidolgozása vált lehetővé aránylag bonyolult digitális részáramkörök (kapuáramkörök, RS flip-flop stb.) funkcionális modellezésére oly módon, hogy egyes kritikus részek modellezése fizikai szintű legyen. Példaként a 1103 típusú dinamikus RAM memóriá-

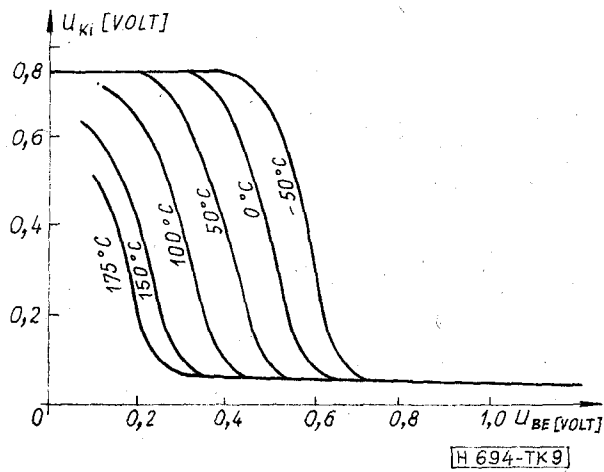


H 694-TK 6

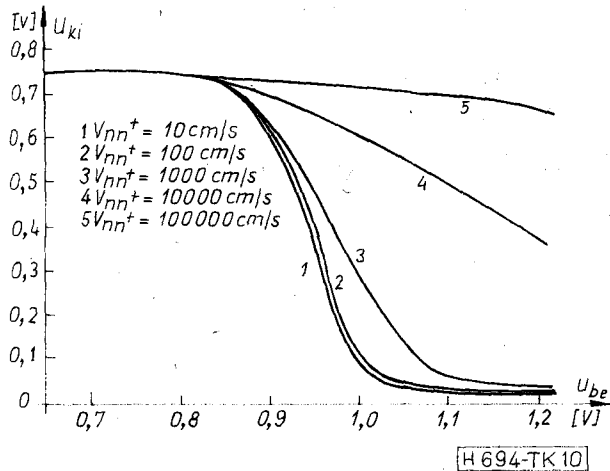
6. ábra. Áramköranalízis programmal számított emittér-bázis-feszültség és emittér-áramsűrűség eloszlása nagyáramú planártranzisztorban



8. ábra. 12L elem egyszerű modellje



9. ábra. 12L elem transzfer karakterisztikája különböző hőmérsékleten

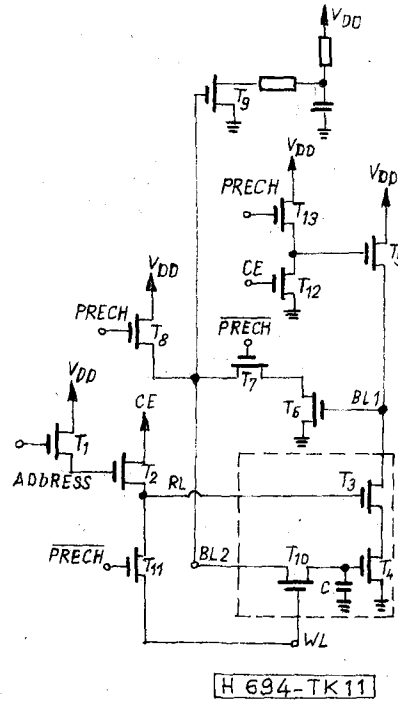


10. ábra. 12L elem transzfer karakterisztikája az n-n+ átmenet rekombinációs sebességének függvényében

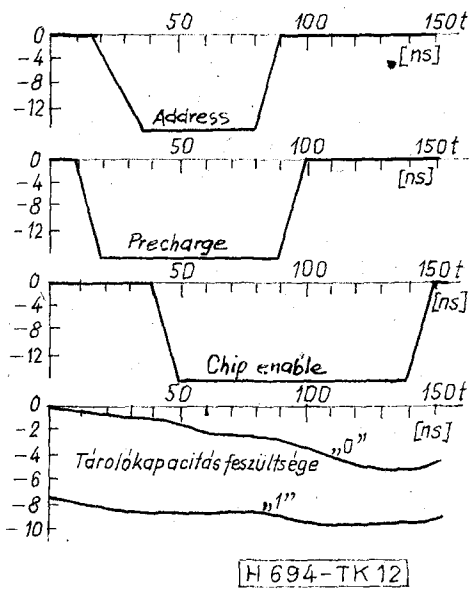
ra (11. ábra) vonatkozó eredményeket mutatjuk be (12. ábra) [14].

### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton is köszönetüket fejezik ki Dr. Dr. Ing. E. H. Valkó Iván Péter professzornak értékes támogatásáért, valamint számos, itt név szerint fel nem sorolt hallgatójuknak, akik lelkesen részt vállaltak egy-egy részletprobléma megoldásában.



11. ábra. Signetics 1103 típusú dinamikus RAM memóriacella kapcsolása



12. ábra. A dinamikus tárolócella kapacitásán levő feszültség logikai 0 és logikai 1 szintek tárolásakor. A feszültség szint kiértékelése kb. a 100 ns-nek megfelelő időpillanatban történik

### IRODALOM

- [1] Linvill, J. G.: Lumped Models for Transistors and Diodes. Proc IRE, Vol. 64. No. 6. pp. 949-984. (1958)
- [2] Székely, V.—Tarnay, K.: Accurate Algorithm for Temperature Calculation of Devices in Nonlinear Circuit Analysis Program. Electronics Letters, Vol. 8. No. 19. pp. 470-472. (1972)
- [3] Székely V.: Accurate calculation of device heat dynamics: a special feature of TRANZ-TRAN circuit analysis program. Electronics Letters, Vol. 9. No. 6. pp. 132-134 (1973)
- [4] Tarnay K.—Székely V.: Elektronikus eszközök transzportfolyamatainak komplex modellezése. MTA Szilárdtest-

- fizikai Komplex Bizottság 1975. áprilisi ülésének anyaga, 1975. 28—34. old.
- [5] *Székely, V.—Tarnay, K.*: Thermal Coupling Phenomena in IC's: Models for Analysis and Synthesis for circuits Based on Thermal Coupling. European Solid State Circuits Conference, Toulouse, 1978. pp. 54—55.
- [6] *Székely V.*: Integrált áramkörök elektro-termikus jelenségeinek modellezése. Kandidátusi disszertáció, 1977.
- [7] *Rencz M.* Tranzisztorok áramköri modellezésének néhány kérdése. Híradástechnika, Vol. 26. No. 7. pp. 193—199 (1975)
- [8] *Rencz M.*: A Livill-típusú tranzisztormodell és alkalmazása a gépi áramkör-analízisben. Doktori értekezés, 1976.
- [9] *Rang T.*: I<sup>2</sup>L, új irányzat a bipoláris technikában I—II. rész. Mérés és Automatika, Vol. 27. No. 5. 7. pp. 191—195., 279—283.
- [10] *Tarnay, K.*: Transient Response of MOS Transistors. Electronics Letters, Vol. 3. No. 5. pp. 155 (1967)
- [11] *Tarnay, K.*: Modeling of MOS Transistors. Chahners MOS Kurs, Göteborg, 1970.
- [12] *Tarnay, K.—Nagy, A.*: Physikalische und Schaltungstechnische MOS-Transistoren Modelle für Elektronische Rechenmaschinen. Festkörper-Bauelemente Vortragsreihe Ilmenau, pp. 89—91. (1975)
- [13] *Masszi F.*: Computer—Aided Design of MOS/LSI Circuits: Device and Functional Models. Periodica Polytechnica, Vol. 22. No. 1. pp. 13—26. (1978)
- [14] *Masszi F.*: Félvezető memóriaelemek modellezése. Egyetemi Doktori értekezés, 1977.