

# **Beszámoló**

## **OTKA T038158**

**Nanoelektronika kvantum-eszközök tér-idő dinamikájának szimulációja  
környezeti hatások figyelembevételével**

Készítette: Varga Gábor,  
BME, Fizika tanszék, 2006. augusztus

1.	Bevezetés .....	3
2.	Kvantum-pont sejt automata (QCA).....	3
2.1.	Kvantum sejt modellezése .....	4
2.1.1	Az energia szintek meghatározása.....	4
2.1.2	Kapcsolási idő modellezése.....	5
2.2	Logikai kapuk modellezése .....	5
2.3	QCA architektúrák kialakítása.....	5
3.	MOS alapú tranzisztorok modellezése .....	6
3.1	Alkalmazott fizikai modellek .....	6
3.2	Fizikai modellek számítógépes implementációi .....	6
3.3	Egydimenziós szimulációk .....	7
3.3.1	Elektron eloszlás szimulációja.....	7
3.3.2	CV-karakterisztika tulajdonságai .....	8
3.3.3	Félempirikus modell .....	9
3.3.4	Nemlineáris távvezeték modell .....	9
3.4	Kétdimenziós szimuláció.....	9
4.	Konklúzió .....	10
5.	Hivatkozások .....	10

## 1. Bevezetés

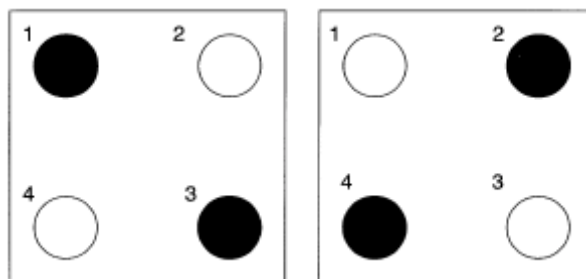
A Moore törvény szerint az integrált áramkörök komplexitása körülbelül kétévenként duplázódik. Ennek eredményképpen a tranzisztorok jellemző vonalszélessége rohamosan csökken, valamint az áramköri elemek sűrűsége növekszik. Következésképpen a disszipálódó energia olyan mértéket ölthet, hogy a hagyományos MOS technológiák esetén a működőképességet veszélyezteti. Továbbá a méretek csökkenésével a szokásos MOS tranzisztorokban, olyan kvantummechanikai hatások jelentkeznek, amelyek az üzemszerű karakterisztikák torzulását eredményezhetik. A fejlődés ütemének fenntartása érdekében intenzív kutatások folynak, amelyek során a szilícium nano-technológia és új számítógép architektúrák kidolgozásával próbálják meg kitolni a Moore törvény szerinti fejlődési ütemet. A nano-technológia és -tudomány robbanásszerű fejlődése történik jelenleg. Erről tanúskodik a kutatásokra fordított erőforrások rohamos növekedése, valamint a kutatások során megfogalmazott célok egyre szélesebb skálája.

Ebbe az irányvonalba tartozik jelen kutatás is, amely a nano-elektronikai eszközök szimulációját tűzte ki célul. A nano-elektronikai eszközök sokszínűsége miatt meg kellett választanunk a kutatás fő irányait. Választásunk a MOS alapú tranzisztor – tehát egy rendkívül sikeres elektronikai eszköz -, valamint a kvantum-pont sejt automata (Quantum-dot Cellular Automata (QCA)) – egy lehetséges új architektúra - eszközökre esett, azzal a megfontolással, hogy a nemzetközi szintű kutatások mind a meglévő eszközök mind az új paradigmák fejlesztését egyaránt célba veszik. Ez a konkrét kutatási tevékenység összhangban van a pályázat kutatási munkatervével.

A 2. fejezet tartalmazza a kvantum-pont sejt automatával, a 3. fejezet MOS alapú tranzisztorokkal kapcsolatos elért főbb kutatási eredményeink rövid leírását. A következtetések a 4. fejezetben találhatóak.

## 2. Kvantum-pont sejt automata (QCA)

A kvantum-pont sejt automata (QCA) sematikus felépítése a következő. Az automata kvantum sejtekből áll, a kvantum sejtek pedig kvantum-pontokból (1. ábra). A QCA működési elve a következő. A kvantum-pontok valójában általában háromdimenziós alakzatok, amelyekben túlfeszültséggel szabályozható a többlet elektronok száma. Egyik leggyakoribb elrendezés szerint egy sejtben négy kvantum-pont helyezkedik el összesen két többlet elektronnal. Az elektronok taszító Coulomb kölcsönhatása következtében két jól megkülönböztethető alap állapot alakulhat ki. Ezek az állapotok feleltethetők meg a logikai egynek, illetve nullának. A kvantum sejteket megfelelően elrendezve logikai kapukat kaphatunk, amely logikai kapukból logikai áramkörök építhetők fel. Fontos megjegyezni, hogy a QCA nem kvantumszámítógép, ugyanis az állapotok terjedése az egyes kvantum sejteken keresztül általában elektromágneses kölcsönhatás révén alakul, nem pedig a kvantummechanikai állapotok összefonódása kapcsán. Ilyen értelemben a QCA klasszikus architektúrát igényel. Abban az értelemben viszont jelentősen eltér a MOS alapú technológiáktól, hogy nem az elektron áramot, hanem az elektronok állapotait vezéreljük a kvantum sejtekben. A QCA logikai kapui értelemszerűen tartalmaznak bemeneti (input) és kimeneti (output) kvantum sejteket. A bemeneti kvantum sejteket vezérelve módosítani tudjuk azok alap állapotait, ezek a bemeneti sejtek a szomszédjaikkal kölcsönhatásba lépve megváltoztathatják a szomszédok állapotait, sít.. Eredményül a kimeneti kvantum sejtek új állapotba kerülhetnek, amelyek tartalmazzák a logikai művelet értékét.



**1. ábra** Kvantum sejt négy kvantum-ponttal. A fekete pontok a többlet elektronokat mutatják. A két állapot a logikai egynek illetve nullának feleltethető meg.

A QCA kutatás legfontosabb problémája, hogy gyakorlatban csak alacsony hőmérsékleten működik, tudniillik 1K alatt. Ez az oka, hogy ennek vizsgálatát tekintettük kutatásaink főirányvonalának.

## 2.1. Kvantum sejt modellezése

A kvantum sejtet két-dimenziós elrendezésnek tekintjük, két többlet elektronnal. Ezen két-elektron rendszer kvantummechanikai viselkedését vizsgáltuk és meghatároztuk a lehetséges energiaszinteket, valamint az állapotfüggvény időbeli változását.

### 2.1.1 Az energia szintek meghatározása

Az energia szintek meghatározására az időfüggetlen Schrödinger egyenletet oldottuk meg numerikusan [1][11][13][15][16].

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} (\Delta_1 + \Delta_2) + U(r_1) + U(r_2) + V(|r_1 - r_2|) \right] \psi(r_1, r_2) = E \psi(r_1, r_2) \quad (1)$$

ahol  $\hbar$  a Planck állandó,  $m$  az elektron tömege, az alsó index utal az 1. illetve 2. elektrorra,  $\Delta$  a Laplace operátor,  $U$  a külső villamos kölcsönhatás energiája,  $V$  a kölcsönhatási energia az elektronok között,  $r$  az elektronok helyvektora,  $\psi$  a sajátfüggvény és  $E$  a sajátenergia. Tehát a problémát nem vezettük vissza egy-elektron állapotok megoldására.

(1) egyenlet megoldása érdekében külön erre a célra kifejlesztettünk egy hatodrendben közelítő véges differencia sémát, amelyet MATLAB programnyelven implementáltunk. A differencia séma kialakítása aprólékos munkát igényelt, ugyanis az egyenlet tagjait megfelelő magas rendben kellett Taylor sorral közelíteni és el kellett érni, hogy csak hatodrendű illetve magasabb rendű tagok maradjanak a maradék tagban a megfelelően elhelyezkedő szomszédos rácspontok figyelembevételével a 4D térben.

Ez a magas rendű séma tette lehetővé az (1) egyenlet megoldását annak ellenére, hogy térkoordinátákban 4D problémát jelent. A magas rendű differencia séma következtében viszonylag kisszámú rácspont is elegendő volt a kellő numerikus pontosság eléréséhez. Az energia spektrum meghatározásából meg tudtuk adni az alapállapot és a legközelebbi gerjesztett állapotok közötti energia különbséget. Ahhoz, hogy a termikus mozgás ne mossa szét a kvantum állapotokat az előbb említett energia különbségnek meg kell haladnia a termikus energiát. Az eredmények alapján megállapítottuk, hogy a szobahőmérsékleten történő működő QCA kb. 5nm méretű kvantum sejteket követel, amely jelenlegi technológiák mellett nem áll rendelkezésre (Lásd 2.3 fejezet) és nagyon szigorú feltétel. A számítások azt is alátámasztják, hogy a fontos mérettartományban legalább exponenciálisan függ az energia különbség a kvantum sejt méretétől.

### **2.1.2 Kapcsolási idő modellezése**

A QCA jellemző kapcsolási idejét a kvantum sejtekben lévő elektronok állapotfüggvénye határozza meg alapvetően [1][7][12]. Ezért a kvantum sejtben található elektronok állapotának leírására kétféle modellt dolgoztunk ki. Az első esetben az (1) egyenletnek megfelelő Hamilton operátort alkalmazva írtuk fel az időtől függő Schrödinger egyenletet és ezt oldottuk meg ún. osztott operátor módszerrel [7]. Ez a módszer jelenlegi implementációjában túl nagy számítógép kapacitást követel mivel 4D probléma. Ezért kerestünk egy másik fizikai modellt, amelyben Hartree közelítésben felírtuk az időtől függő egy-elektron Schrödinger egyenleteket, amelyet numerikusan megoldottunk. Ebben az esetben egy-egy egyenlet csak 2D a koordinátatérben [12]. A számítási eredmények demonstrálták a külső tér vezérlő hatását, amelyből kapcsolási idő is számolható az egyes állapotok kialakulása között eltelt idő meghatározásával.

### **2.2 Logikai kapuk modellezése**

Mivel a QCA sajnálatos módon jelenleg csak igen alacsony hőmérsékleten működik a számítógépes szimuláció a további gyakorlati kutatások segítségére lehet a maga flexibilitásával. Az elkészített szimulációs program főbb tulajdonságai a következők [5]:

- MATLAB programkörnyezet, grafikus felhasználói felület
- Logikai kapuk: többségi kapu (kicsi és nagy), vonal elrendezés, sarok elrendezés, T alakú elrendezés
- Kölcsönhatási görbék a szomszédos cellák között: tangens, lineáris, kvadrátikus, bináris és felhasználó által definiált alakok
- Belső kvantum-pont potenciál gát (maximális polarizálhatóság)
- Kölcsönhatási mód: 4 legközelebbi szomszéd, 8 legközelebbi szomszéd
- Hőmérséklet hatása félempirikus formulával
- Kvantum cellák rendezetlen elhelyezkedése

A program segítségével meg lehet vizsgálni a különböző paraméterek hatását. Ezek közül a legérdekesebb a hőmérséklet hatása, amely alátámasztja annak destruktív hatását a QCA működésére. Bizonyos hőmérsékleten már nem alakulnak tiszta bemeneti ill. kimeneti állapotok. Tehát nem lehet eldönteni, hogy az elektron állapotok mely logikai értéknek felelnek meg.

### **2.3 QCA architektúrák kialakítása**

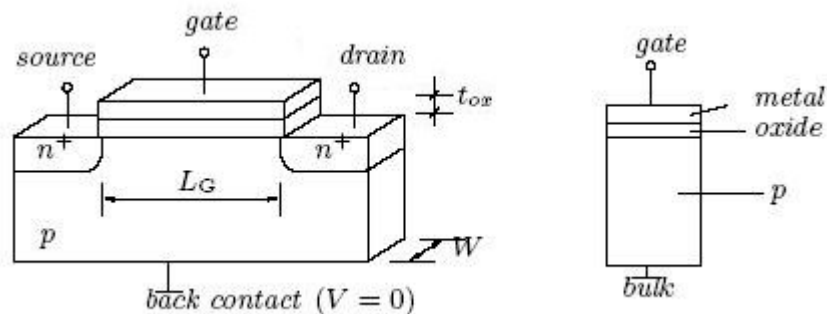
A fenti eredmények alapján látható, hogy a QCA gyakorlati megvalósítása nagymértékben függ a kvantum-pontok kialakíthatóságától, illetve azok tömbökbe való szervezésétől. A tömbökbe való szervezés lehetővé teheti egyes kvantum sejtek kialakítását és vezérelhetőségét. A kutatási eredmények azt mutatják [11][13][15], hogy a szobahőmérsékleten történő működéshez kvantum sejt méretének 5nm körül kell lenni. Ennek gyakorlati megvalósíthatóságának egyik útja a mesterséges és a természetes kvantum pontok kombinálása. Tudniillik a nagyobb méretű mesterséges kvantum-pontok (kb. 45nm) adják a tömbi szerveződést, míg a kisebb méretű természetes kvantum pontok (3-6nm) biztosítják a kvantum hatásokat. További lehetőség a kvantum-pontok kémiai molekulákkal történő kialakítása. Sajnos eddig még nem sikerült QCA működést ezen az alapon demonstrálni. Harmadik lehetőség a szilárdfelületen adszorbeált részecskék QCA-ba történő szervezése. Ezen folyamatok modellezését és jobb megértését célozzák a részecske-felület időfüggő kölcsönhatását elemző kutatásaink [1][6][14]. Ebben az esetben az időfüggő Schrödinger

egyenlet megoldásával kapott állapotfüggvényből nyerünk információt a felületeken lejátszódó folyamatok dinamikájáról.

A kutatások alapján világosan látszik, hogy a QCA mint új számítástechnikai architektúra csak felület technológiák fejlődésével nyerhet teret.

### 3. MOS alapú tranzisztorok modellezése

Ebben a fejezetben a MOS alapú tranzisztorok modellezésében elért eredményeinket ismertetjük röviden. Alapvető cél a miniaturizálás hatásának vizsgálata a MOS alapú tranzisztorok és ennek különböző változatainak esetén. A jellemző paraméterek nanométer tartomány irányába történő csökkentése esetén vizsgáltuk a működési mechanizmusban történő változásokat.



2. ábra Egyszerű, sematikus elrendezése a MOSFET tranzisztornak. A jobb oldali metszet az 1D modell esetének felel meg.

#### 3.1 Alkalmazott fizikai modellek

A számítógépes szimulációkat különböző modell szinteken végeztük el annak érdekében, hogy lássuk a különböző fizikai modellek közötti eltéréseket, és ezekből következtetni tudjunk érvényességi körükre. Alapvetően három modellt használtunk, a drift diffúziós (DD) modellt, a sűrűség gradiens (Density Gradient) (DG) modellt, valamint az ún. Schrödinger-Poisson (SP) önkonzisztens modellt.

A DD modell fél-klasszikus, makroszkópikus modell, amelyet a 60-as évek közepe óta alkalmaznak a félvezető eszközök modellezésére.

A DG modell a DD modell kvantumossal korrigált változata. A teljes, kvantummechanikai leírást jobban közelítő eredményeket ad. A modell alapja, hogy az elektronok és lyukak eloszlását meghatározó kvázi Fermi-szintet a DD modellnél alkalmazott tagokon túl egy kvantumossal korrekciós tag is befolyásolja. Ez a korrekciós tag az elektron ill. lyuk sűrűségének gradiensétől függ. Ezért a modell nemlineáris jelleget mutat.

Az SP modell a DG modellnél teljesebb kvantummechanikai leírást ad, amelyet a Schrödinger és Poisson egyenletek önkonzisztens módon történő megoldásával érünk el. Ekkor egyetlen elektront helyezünk a szimulált félvezető struktúrába, és ennek állapotát számítjuk ki. A modell az egy-elektron közelítés érvényességéig pontos.

#### 3.2 Fizikai modellek számítógépes implementációi

DD illetve DG modell esetén 1D illetve 2D saját fejlesztésű kódot használtunk, míg SP modellnél a szabadon hozzáférhető egy dimenziós SCHRED nevű programot.

A DD modell kapcsán megvizsgáltuk a különböző leírási módok numerikus lehetőségeit. Szimulációkat végeztünk a Slotboom-leírási formalizmus szerint [2][3]. A későbbiekben a kvázi Fermi-szintet illetve az elektron- és lyukkonzentrációt használó

formalizmussal dolgoztunk [4][8][10]. A numerikus megoldás Scharfettel-Gummel diszkretizációval történt.

A DG modell esetén a nemlineáritás DD modelltől való eltérő jellege miatt más diszkretizációs sémát kellett alkalmazni. A térbeli felosztástól függően kétféle diszkretizálási sémát használtára került sor [3][4]. Nagyobb felbontásra egy konzervatív nemlineáris sémát, a finomabb felbontású illetve nem egyenközű felosztású részekre egy kevert sémát vettünk igénybe. A programozás általában MATLAB környezetben történt.

### **3.3 Egydimenziós szimulációk**

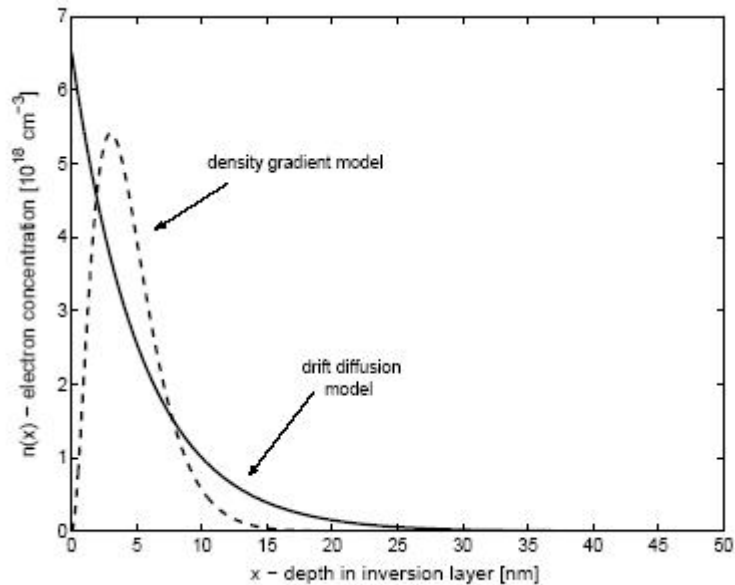
Az egydimenziós MOSFET elrendezés vizsgálatának jelentősége, hogy a MOSFET eszközök működését alapvetően a kapu elektróda feszültsége és a kapu közeli területeken kialakuló elektron és lyuk eloszlás határozza meg. Többek között a tranzisztoron keresztül folyó áramot is első közelítésben a kapu feszültség határozza meg. Az egydimenziós szimulációk célja ennek az összefüggésnek a vizsgálata volt, a kapu feszültség és a kapu-szubsztrát közötti kapacitás vizsgálatán keresztül.

Az alábbi szimulációk kerültek elvégzésre:

- DD modell szimulációja  
A klasszikus modellt azért alkalmaztuk, hogy összehasonlítási alapként szolgáljon, valamint hogy az érvényességi körét is meghatározhassuk.
- DG modell szimulációja  
A kvantum korrekciót figyelembe vevő modelltől a fizikai mennyiségek pontosabb leírását várjuk. Számításaink szerint a DD modellhez képest eltérések lépnek fel, már nagyobb kapu-oxid vastagság (5-10 nm) során is. A kialakuló elektron eloszlás lényegesen különbözik a DD modellnél kapott eloszlástól [2][3][4]. Továbbá a kialakult elektron eloszlás miatt a kapacitás-kapu feszültség karakterisztika (CV-görbe) alakja is változik [9].
- SP modell szimulációja  
A kapott eredmények alapján a DG modell helyállósága ellenőrizhető, amelyet elvégeztünk. Az SP modell és DG modell által kapott eredmények közel azonosak. Az elektron koncentráció a DG modellnél kapottakkal jól egyező. A CV-görbe menete és DD modelltől való eltérése a DG modell eredményével közel azonos. A karakterisztikus görbék különbözőségei az alkalmazásoknál számottevő változásokat eredményeznek [8].

#### **3.3.1 Elektron eloszlás szimulációja**

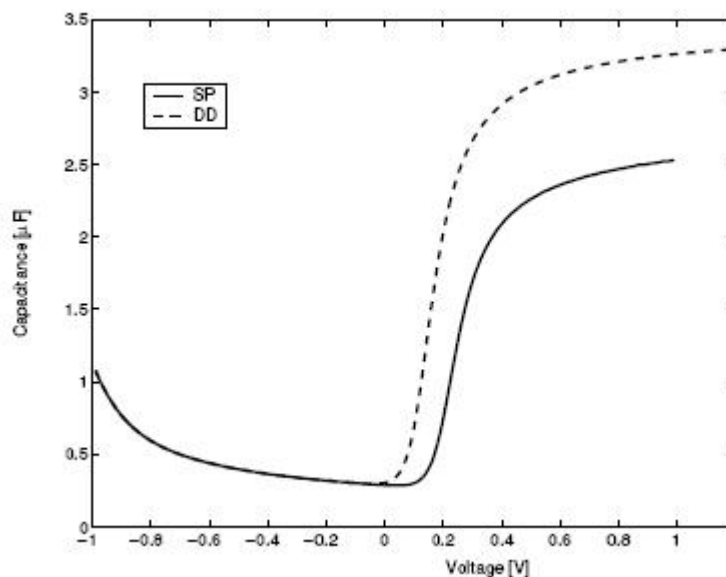
A különböző modellek alkalmazását alátámasztja az elektron eloszlás szimulációja. Bizonyos kapu-oxid vastagság alatt láthatóan különbözik a DD és a DG modell által szolgáltatott elektron eloszlás [2][3][4] (lásd 3. ábra).



3. ábra Az elektron eloszlás az inverziós rétegben DD illetve DG modell esetén.

### 3.3.2 CV-karakterisztika tulajdonságai

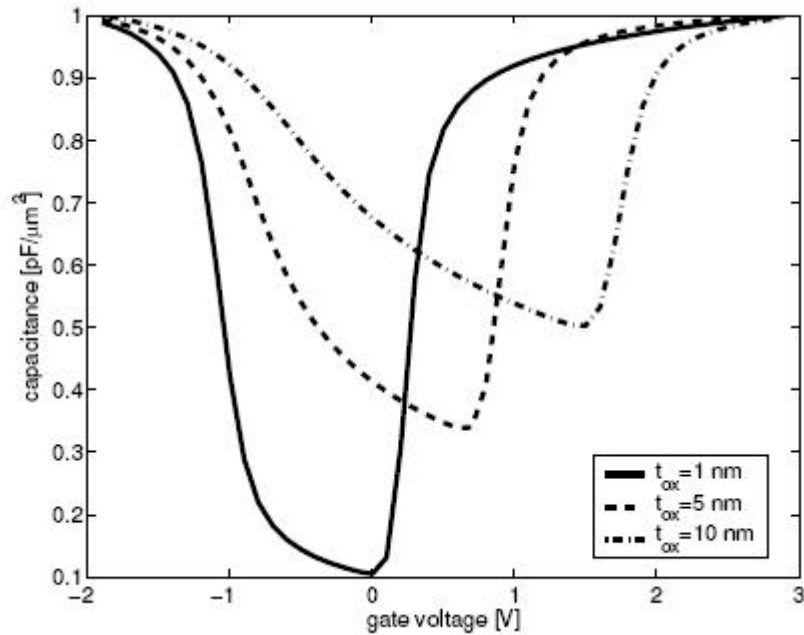
A szimulációk alapján sikerült megmutatni, hogy a kapu-oxid vastagságának csökkenésével a CV-görbe alakja jelentősen deformálódik. A deformáció minden modell alkalmazása esetén megjelenik, mértéke és jellege azonban eltérő a különböző modellek esetében (4. ábra). A DG [10] és SP modellek [8] hasonló görbéket eredményeznek.



4. ábra A CV görbe SP illetve DD modell esetén.

A CV görbe esetén sikerült megmutatni, hogy az extrémális értékek változásának tendenciája hasonló az egyes modellek esetén, de a változás mértéke és az extrémális értékek nagysága különböző [8][10]. Továbbá sikerült arra rámutatni, hogy a CV-görbe erősen nemlineáris tartománya (ahol a konstans-jellegű C-V kapcsolat nem áll fenn) változik a kis méretű oxid vastagságok felé haladva [10] (lásd 5. ábra).





5. ábra CV karakterisztika különböző kapu-oxid vastagság esetén SP modellel számolva.

### 3.3.3 Félempirikus modell

A kapacitás távvezeték modellből ismert félempirikus modelljét illesztettük egydimenziós szimulációs eredményekhez. Ennek jelentősége az, hogy a jól illeszkedő félempirikus modell esetén a kvantumos effektusokból következő változások egy mérhető tulajdonság (CV-karakterisztika) alapján számíthatók ki. Ezáltal az (ipari, termelési) mérések alapján a félklasszikus szimulációkból kapott eredmények korrekciója elvégezhető [8].

### 3.3.4 Nemlineáris távvezeték modell

MOS kapacitások egyik alkalmazási lehetősége, hogy nemlineáris távvezeték (Nonlinear Transmission Line (NLTL)) elrendezésekben kapacitásként alkalmazzuk. Ennek oka az, hogy a kapu feszültségtől nemlineáris módon függ a MOS kapacitása, és ez éppen megfelelő az NLTL szempontjából.

A különböző modellek esetében történő szimulációk megmutatták, hogy az NLTL paramétereiben akár 20%-os eltérések is megjelenhetnek [8][10]. Egyértelműen bebizonyosodott, hogy a nanométer méretekben történő realizáció esetén a pontosabb modellek alapján kapott eredmények az NLTL eszköz működésében lényeges változásokat mutatnak meg.

## 3.4 Kétdimenziós szimuláció

Ha a gyártási technológia jellemző méreteinek csökkentésével a nanométer tartományba jutunk, akkor az egydimenziós szimulációk alapján kapott eredmények nem adhatnak megfelelően pontos működési modellt. A pontosabb leíráshoz térben kétdimenziós modell alkalmazása szükséges, amely magában foglalja az eszköz keresztirányú (ez volt a korábbi egydimenziós modell) és a hosszanti irányú modellezést is. Ez utóbbi a lerövidülő csatorna hossz miatt megjelenő rövid csatorna effektusok (Short-Channel Effect (SCE)) miatt szükséges. Lényegében a keresztirányú leírás megváltozását jelenti azáltal, hogy a forrás (source) és nyelő (drain) térségek hatása is megjelenik a csatornában lévő elektron- és lyuk koncentrációban.

A jelenlegi számítások alapjául a fentebb bemutatott DD modell szolgál. A csatorna modellezése a koncentrált paraméterű hálózati helyettesítő kép helyett egy elosztott paraméterű helyettesítő képpel történik. Ekkor a folyamatok leírásánál megjelenik a késleltetett válasz, amely a koncentrált paraméterű helyettesítő kép esetén nem lehetséges. A késleltetések szerepének ismerete a nanoméretű eszközök használatához szükséges nagyobb frekvenciájú órajel miatt szükséges. A jel terjedési idejét befolyásolja a csatornán belüli terjedés sebessége, amelyet azonban a SCE effektusok határoznak meg.

Az SCE hatását a vizsgáltuk MOSFET és DGMOSFET esetére. A csatorna távvezeték helyettesítő képének paramétereit vizsgáltuk a csatornahossz csökkenés függvényében. Megvizsgáltuk a közelítés alkalmazhatóságának határait is [9].

## 4. Konklúzió

A kutatás keretein belül a kutatási tervnek megfelelően nano-elektronikai eszközök szimulációja történt meg a hagyományos irányvonalnak tekinthető MOS alapú tranzisztorok, és az új architektúrák egyikét képviselő kvantum-pont sejt automata (QCA) esetén. A QCA-t érintő kutatásaink során modelleztük magát a kvantum sejtet a lehetséges kvantummechanikai időfüggő és időfüggetlen állapotok meghatározásával. Vizsgáltuk a környezeti hőmérséklet hatását a kvantummechanikai elektron állapotokra, valamint a vezérlő tér kapcsolási idejét az egyes állapotokra. Programot készítettünk logikai kapuk modellezésére. Elemeztük a szobahőmérsékleten működő QCA megvalósíthatóságának feltételeit, valamint a technológiai realizálás lehetőségeit.

A MOS alapú tranzisztorok vizsgálata során kidolgoztunk 1D és 2D megoldó programot a drift diffúziós és sűrűség gradiens modellre. Megvizsgáltuk a modellek érvényességi körét csökkenő oxid vastagság függvényében. Az elektron eloszlás és kapacitás meghatározásával kvantitatív értékeket kaptunk a kvantum effektus lényeges szerepére. Ezenkívül, áramkörü szimulációval kimutattuk, hogy a nemlineáris távvezeték esetén a kvantum hatások jelentős viselkedésbeli eltérést eredményezhetnek.

A kutatás eredményeiről a közeljövőben várhatóan további publikációkat teszünk közzé.

## 5. Hivatkozások

[1] G. Varga: *Computer Simulation by quantum mechanical time-dependent wavepacket method, especially for atom/molecule-solid surface interaction*, Journal of Physics: Condensed Matter 14 (2002) 6081-6107, 2002

[2] Reichardt, G. Varga and G. Veszely: *Computer simulation of MOSFET and HEMT devices by density gradient method*, 22nd European Conference on Surface Science (ECOSS-22), 7-12 September 2003, Praha, Czech Republic, 2003

[3] András Reichardt, G. Varga and G. Veszely: *Simulation of Small Gate Transistors using Density Gradient Approach*, 1st International Applied Physics Conference, Badajoz, Spain, 13-18 October 2003, 2003

[4] Varga G., Veszely G. and Reichardt A: *Computer simulation of nano-scale transistor devices*, IVC-16/ICSS-12/8th Int. Conference on Nanometer Scale Science and Technology/AIV-17, June 28-July 2, 2004, Venice, Italy, Proceedings Book-2, p 690, 2004

[5] G. Varga and G. Veszely: *Simulation of quantum-dot cellular automata*, IVC-16/ICSS-12/8th Int. Conference on Nanometer Scale Science and Technology/AIV-17, June 28-July 2, 2004, Venice, Italy, Proceedings Book-2, p 408, 2004

[6] Varga G.: *Computer simulation of atom-solid surface scattering*, IVC-16/International Conference on Solid Surface/Nano-8/AIV-17, June 28-July 2, 2004, Venice, Italy, Proceedings Book-2, p 268, 2004

[7] Varga G.: *Investigation of switching speed of the quantum-dot cellular automata*, European Conference on Surface Science, ECOSS 23, September 4-9, 2005, Berlin, Germany, Final Program and Book of Abstracts, p 325, 2005

[8] Reichardt, G. Varga and Gy. Veszely: *Effect of scaling down on some NLT parameters*, 13th International Conference on System, Signals & Image processing, IWSSIP'06, Budapest, Hungary, September 21-23 2006, 2006

- [9] Reichardt, Gy Veszely and G. Varga: *Transmission line representation of MOSFET channel*, 12th Internationales IGTE Symposium (IGTE: Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik), Graz, Austria, September 17-20 2006, 2006
- [10] Reichardt, Gy Veszely and G. Varga: *Change of parameters of equivalent circuits in case of nanoscale*, 12th Internationales IGTE Symposium (IGTE: Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik), Graz, Austria, September 17-20 2006, 2006
- [11] G. Varga: *Investigation of Possibility of High Temperature Quantum-Dot Cellular Automaton*, International Conference on Nanoscience and Technology, NANO9 meets STM'06, July 30-August 4 2006, Basel, Switzerland, July 30-August 4 2006, Proceedings Book p. 88, 2006
- [12] G. Varga: *Quantum mechanical model of switching time of quantum-dot cellular automata*, European Conference on Surface Science, ECOSS 24, September 4-8, 2006, Paris, France, 2006
- [13] G. Varga: *Conception of high temperature quantum-dot cellular automata*, European Conference on Surface Science, ECOSS 24, September 4-8, 2006, Paris, France, 2006
- [14] G. Varga: *Dynamical investigation of Thermal Energy Atom Scattering from solid surfaces*, European Conference on Surface Science, ECOSS 24, September 4-8, 2006, Paris, France, 2006
- [15] G. Varga: *Investigation of possibility of high temperature quantum-dot cellular automata*, Journal of Physics: Conference Series, submitted for publication, 2006
- [16] Numerical solution of 4D time independent Schrödinger equation, under preparation