

Elektrosztatikus mérés szimulációja multiprocesszoros környezetben

Bakró-Nagy István

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Budapest
bakro.istvan@gmail.com

Reichardt András

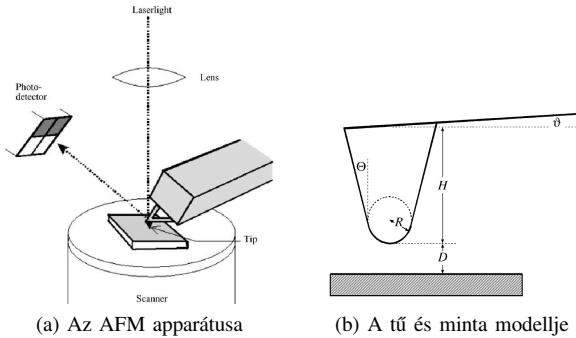
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Budapest
reich@evt.bme.hu

Kivonat—Atomerő mikroszkóppal való fémezett felületű minta felületi töltéssűrűségének mérése során kritikus a tű és a minta közötti kapacitás ismerete. A kapacitás értékét közelítések mellett lehetséges analitikusan kifejezni. Numerikus szimulációval pontosabban ismerhetjük az értéket, ezáltal nagyobb felbontás is érhető el. A szimuláció során a lehetséges párhuzamosításokat felhasználva a számítási időt elfogadhatóra csökkentjük.

Index Terms—AFM, felületi töltéssűrűség, numerikus szimuláció, párhuzamos számítás, OpenCL, MATLAB Parallel Toolbox

I. BEVEZETÉS

1986-ban Binning demonstrálta az atomerő mikroszkóp (AFM) ötletét [1], ami mára a nanotechnológia egyik legfontosabb eszköze lett. Felhasználható képalkotásra, nanolitográfiára és adott anyag alakítására [2]. Az AFM apparátusa az adott minta felülete és a felette pásztázó kanyarlevél végére erősített tű kölcsönhatásának vizsgálatát végzi. (lásd 1b. ábra) A felület és a tű közötti domináns kölcsönhatás határozza meg, hogy az anyag melyik fizikai mennyiségét kaphatjuk meg.



1. ábra. Az AFM apparátusa látható az (a) ábrán. A lézernyaláb a kanyarlevél felületéről tükröződve egy fotodetektorra irányul. A tű pozícióját ez alapján nagy pontossággal ismerjük. A (b) ábrán a minta és a felette lévő tű modellje látható a kapacitás analitikus számításához. A tű R sugarú H magasságú és D távolságra van a mintától. (Forrás: [3])

Az AFM felhasználása kontakt illetve kopogtató üzemmódú lehet. A kontakt mód során a felületen végighúzzuk a tűt és mérjük a z irányú elmozdulását. Így képesek vagyunk a minta felületén lévő atomok elrendezéséről magasságtérképet adni. Kopogtató mód [4] során a tűt elemeljük a mintától és f frekvenciával rezgetjük. A letapogatás során az átlagos minta-tű távolságot a kontakt módú magasságtérkép felhasználásával konstans értéken tartjuk. A kanyarlevél dinamikáját ismerve a rezgetés frekvenciájának eltéréseiből számítható a tűre ható erő. Ezen erő nagyságát két tényező befolyásolja:

- a) a minta és a tű közötti feszültség,
- b) a minta felületi töltéssűrűség eloszlása.

A cikkben a felületi töltéssűrűség mérését tekintjük célunk. A [5], [3] szerint az erő a) komponensét a minta és a tű közötti kapacitásból az (1) szerint származtathatjuk.

$$F_s = -\frac{dE}{dD} = -\frac{d(CV^2/2)}{dD} = -\frac{1}{2} \frac{dC}{dD} V^2 \quad (1)$$

Ha a minta pásztázása során ezen a) erőkomponens konstansnak mondható, tehát a felületi érdesség kicsi, akkor a töltéssűrűg mérésében állandó hibát okoz. ami eliminálható. Az (1) számításában a kritikus elem a kapacitás értéke, amit numerikus számítás mellőzése esetén a [6] szerinti analitikus eredményt használhatjuk fel. A tű formáját a (1b ábra) szerintinek veszi és a mintát sík felületűnek feltételezi. Ezen utóbbi feltételezés legtöbb esetben helyénvaló, viszont a minta nagyfokú érdessége és a tű egyedi formája esetén érvényét veszti. Ilyen esetben a kapacitás értéke mintáról mintára változik és állandó hiba helyett, a mérést zajként terheli. A kapacitás numerikus szimulációjával ezen zajt is ki lehet küszöbölni. Persze ezen szimulációt minden egyes mérési pontban el kell végezni, aminek a kivitelezése csak multiprocesszoros környezetben lehetséges elfogadható idő alatt.

II. A FELADAT

A minta egy fémezett felület, aminek magasságtérképét mérések eredményeként adott pontossággal ismerjük. A mérések egy négyzetes háló felett történtek, amelynek a háló mindkét vízszintes irányában $\delta_x = \delta_y \approx 180nm$ azonos felbontása, illetve a függőleges $\delta_z \approx 20nm$ felbontása volt. A töltéssűrűség méréséhez szükséges második pásztázás során a tűt felemeljük és a mintához képest V_{tu} potenciálra kapcsoljuk. Ezután a fémezett felületről mindig azonos távolságra rezgetjük és ezen hosszú hegyes tűre ható erőt mérjük.

Végző cél olyan szimulátor építése, amelynek segítségével közel valós időben lehetséges a mérés alapján a felületi töltéseloszlásról korrigált/pontosabb információt kapni.

A cikkben felhasznált magasságtérkép-mérési eredmény (2. ábra) egy 512×512 méretű szürkeárnyalatos *.tiff állomány, amely értéke $0 - 255$ -ig terjed.

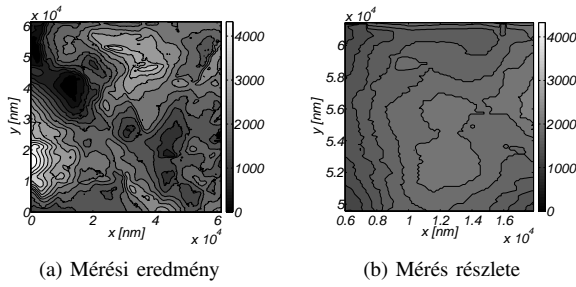
III. SZIMULÁCIÓ

III-A. Fizikai probléma matematikai formalizálása

A megoldandó feladat egy elektrosztatikus feladat. A minta és a tű közötti térben nincsenek töltések, így itt a Poisson egyenlet helyett a Laplace-egyenlet (2) érvényes.

$$\Delta V(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

Az egyenletet későbbiekben részletezett (III-B) megfontolások végett egy redukált 3D-s téren oldjuk meg. Ezen 3D-s térre egy inhomogén



2. ábra. Méréssel kapott magasságtérkép. Felbontás $d_x = d_y = 120nm$ $d_z = 18.03nm$

ponthálót illesztünk, amelynek vízszintesen $d_x = d_y$, függőlegesen d_z a felbontása. A függőleges felbontás megegyezik a használt AFM apparátus felbontásával $d_z = \delta_z$. Az így kapott térbeli háló minden pontjához hozzárendeljük az $V_{i,j,k} \simeq V(id_x, jd_y, kd_z)$ potenciált. Dirichlet határfeltételek a felület fémezése, amely zérus potenciálú és az adott (V_{tu}) potenciálú tű fémes felülete. A térnek a minta felületétől különböző határfelületén homogén Neumann feltételt alkalmazunk a szimmetriák (végtelen tér) és a töltésmenység miatt.

Az így adódó lineáris egyenletrendszer megoldására lehetséges direkt és iteratív megoldó algoritmusokat alkalmazni. A párhuzamosítási szándékok miatt az iteratív megoldást választottuk, mivel a multiprocesszoros környezetek tipikusan kevés fajlagos-memóriával¹ rendelkeznek. Ekkor nem teljesen pontos megoldást kapunk, azonban gyorsabban juthatunk el a kívánt eredményhez. A számítás pontosság növelhető az iterációt leállító konvergencia követelmény keményebb megszabásával, ami persze több iterációt jelent.

Az iteratív megoldás során a megoldás aktuális értékének kiszámításához az előző megoldásból indulunk ki. A (2) egyenletben szereplő deriválást az elsőrendű Taylor közelítés alkalmazásával a (3) szerinti 6-pontos sémát kapjuk.

$$V_{ijk}^{n+1} = \Delta_1 \cdot (V_{i-1,j,k}^n + V_{i+1,j,k}^n + V_{i,j-1,k}^n + V_{i,j+1,k}^n) + \Delta_2 \cdot (V_{i,j,k-1}^n + V_{i,j,k+1}^n) \quad (3)$$

ahol $V_{i,j,k}^n$ az az n -dik iterációs lépésben az i, j, k indexű pontban mérhető potenciált jelöli, Δ_1 a vízszintes felbontásból, Δ_2 a függőleges felbontásból adódó állandó.

III-B. Szimuláció felépítése

A felületmérés során a vízszintes felbontás jóval kisebb, mint a függőleges felbontás, azaz a pontok vízszintes távolsága sokkal nagyobb a függőlegesnél $d_x = d_y = 120nm \gg d_z = 10nm$ (lásd II. rész). A Coulomb-kölcsönhatás a távolság négyzetével fordítottan arányos, így az előbb említettek értelmében egy mérési pont szomszédjait, pontosabban egy redukált környezetét szükséges csupán szimulálni (Másképpen megfogalmazva a vízszintes mérési pontok távolsága jóval nagyobb mint a Coulomb-kölcsönhatás effektív távolsága). Ezzel az elhanyagolással a feladat már numerikusan kezelhető méretűre csökken.

Ezen módon egy mért pont 3×3 -as környezetét vesszük figyelembe, a középső pont felett lévő elektródát (tűt) feltételezve. A szimulációs tér alsó felületét a mért magassági 3×3 mintákból kell meghatározunk. Mivel ezen pontokra úgy is tekinthetünk, mint a

¹Fajlagos alatt az egy szimulációra jutó memóriát értem. (Természetesen ezen szimulációk egyszerre futnak, így a fajlagos-memória akkumulálódik.)

minta magasság-függvényének a mintavételezésével kapott mintáira, így a közbűlő pontokat interpolációval (mozgó átlagolással) kapjuk meg. Az interpoláció N_{ip} faktorával² lehetséges a szimulációs tér vízszintes felbontását $d_x = d_y = \delta_x / N_{ip}$ megkapni.

A szimulációk során a felület magasságának mérési adatait már ismertnek feltételezzük. A teljes magasságtérkép pontjait külön-külön vizsgáljuk. Egyetlen pontban a mérési eredmény kiszámításának lépései az alábbiak:

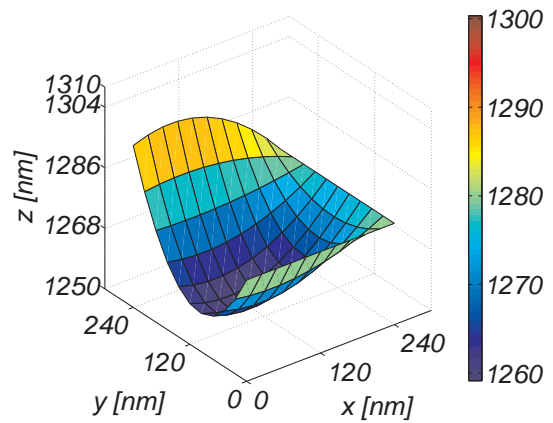
- 1) A pont körüli felület 3×3 -as mérési részének megállapítása,
- 2) Közbenső (virtuális) mérési pontokkal a belső felbontás növelése interpolációval,
- 3) Szimulálandó tér méretének számítása,
- 4) Direkt/iteratív megoldó algoritmussal a tér meghatározása, a tűre ható erő számítása illetve a tű alatti töltésmennyiség számítása,
- 5) Adatok mentése.

IV. A SZIMULÁTOR BEMUTATÁSA

A prototípus algoritmus fejlesztése MATLAB környezetben történt, ami később referenciaként szolgál. Alap MATLAB utasításokat használva több órát vesz igénybe a szimuláció futtatása. A MATLAB Parallel Toolbox-nak segítségével a szimulációt lehetséges párhuzamosan több processzormagon futtatni. Ezzel párszoros sebesség növekedés érhető el. A következőkben magát az algoritmust és az OpenCL keretrendszerben történő implementációját mutatjuk be. Majd az eredmények bemutatása során kerül összevetésre a MATLAB referencia, a MATLAB Parallel Toolbox segítségével, az OpenCL processzoron és az OpenCL GPU-n való futtatási ideje.

IV-A. A lépések részletezése

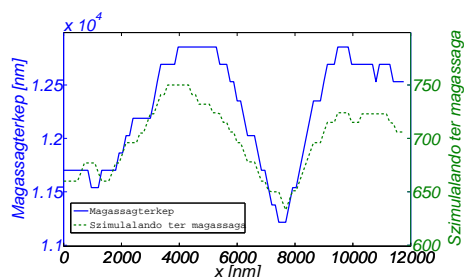
IV-A1. Interpoláció: A korábban elmondottak alapján a felületet további virtuális pontokkal egészítjük ki. Az virtuális mérési pontokat a legegyszerűbb síklapos közelítéssel alkothatjuk meg, a magasságmérési felbontás figyelembevételével. A szimulátorban egy általánosabb módszert alkalmazunk, ami egy 2D-s mozgó átlagoló szűrővel való simítás. A szűrővel aluláteresztést tudunk elérni, ami a minta magasságának mintavételezése utáni rekonstrukcióját jelenti. Egy ilyen interpoláció eredményét láthatjuk a 3. ábrán.



3. ábra. 3×3 mérési pont 11×11 pontba való interpolációja

IV-A2. A szimulálandó tér mérete: A szimulálandó tér (hasáb) alapja adott az előzőleg említett interpolált felületként, míg a magassága nem. Ezt a következő két mennyiség közül a nagyobbikkal határoztuk meg:

² N_{ip} -szeresére növeljük a pontok számát.



4. ábra. A mérési eredmény egy vonal menti részlete (folytonos vonal) és az ezen mérési pontokhoz számított szimulációs tér magassága (szaggatott-vonal)

- Középső pont fölött lévő tű közepének magassága,
- A (3×3) környezet legalacsonyabb és legmagasabb pontjának különbsége.

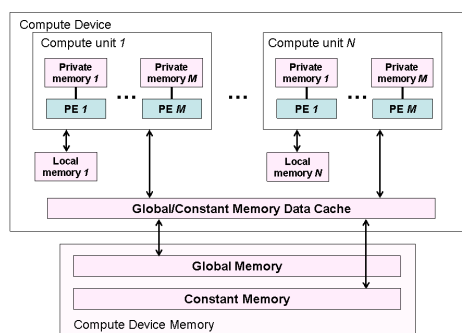
A magasságtérkép egy vonalának részlete látható a 4. ábrán, továbbá a szimulálódó tér (hasáb) magassága.

IV-A3. Iteratív megoldó algoritmus: Az iterációhoz a térháló pontjaihoz két mátrixot (tömböt) rendelünk, ami a pontok potenciáljának aktuális (U_{now}) és előző (U_{prev}) értékeit tartalmazza. Az aktuális értékeket (3) szerint számítjuk, majd az egész térre számítjuk az előzővel vett különbségének négyzetösszegét (normáját). E mérték képviseli a konvergencia szintjét, amit az iteráció során vizsgálva jutunk el a kívánt konvergencia szintre. Ha nem értük el a konvergencia szintet, akkor az előző két mátrixot felcserélve iterálunk tovább.

IV-A4. Adatok mentése: Tesztelhetőségi megfontolások végett nem csak a tűre ható erő (villamos térerősséget) exportáljuk, hanem a konvergencia szintjének változását és az interpolált felületet is. Az exportálandó menysígek „kis” mérete miatt egyszerű *.csv fájlként kerülnek mentésre. Ezen fájlok további poszt-processzálása MATLAB vagy munkalap kezelő szoftverrel is elvégezhető.

IV-B. OpenCL architektúrája

Az Open Computing Language (OpenCL) keretrendszer [7] közös nyelvet, magas szintű programozási interfészt és hardware absztrakciót nyújt a fejlesztőknek adat- vagy feladat párhuzamos számítások gyorsítására különböző számítógépsíken (CPU, GPU, FPGA, DSP, ...). Az OpenCL modellje a különböző „device”-okra bontható, amik több „compute unit”-ot (processzor-magot) tartalmaznak és ezeket heterogén módon kezeli.



5. ábra. OpenCL „device” architektúra [7]

A „compute unit”-ok kiéheztetésének elkerülése végett több ezer „work-item” virtuális osztozik rajta. Továbbá ezen „work-item”-ek „work-group”-okba vannak rendezve (később részletezett megfontolások végett). A „compute unit” kiéheztetését a „device”-on található memória chippek lassúsága okozza. Ennek hárdiveres megoldása a több

szintű prediktív cache memória beiktatása a „compute unit” és a külső memória közé. Mivel a bank szervezett külső memóriák hozzáférési ideje relatíve nagy így a memória szervezésére nagy hangsúlyt kell fektetni.

Az OpenCL négy memória szintet különböztet meg, ami az II táblázatban és az 5. ábrán látható. Ahhoz, hogy a rendszerben rejlő teljesítményt kiaknázzuk, három fontos kérdést kell a szimulátor magjának implementálásakor megválaszolniuk:

- **Mennyit?:** Tisztában kell lennünk az aktuális memória fogyasztással és a szükséges memóriamérettel.
- **Honnan-hova?:** Fontos, hogy a lehető legközelebb legyen az adat a „work-item”-hez.
- **Mikor?:** Mivel a memória művelet alatt a „work-item” nem dolgozik, így átadja a helyét egy másiknak. Ennek a megfelelő szinkronizációjával nagyobb kihasználtság érhető el (load balance).

II. táblázat. OpenCL memória szintek

	Global	Constant	Local	Private
Host	Dinamikus R/W	Din. R/W	Din. R/W	
Kernel	R/W	Statikusan R	Statik. R/W	Statik. R/W
Sebesség	Lassú	Gyors	Gyors	Regiszter
Méret	1 Gbyte <	~ 64 Kbyte	~ 16 Kbyte	< 1 Kbyte

OpenCL keretrendszerben történő programozás során két programot kell írunk. Az egyik a „host”-on fut, ami elvégzi a probléma összeállítását, memória allokálását, argumentumok beállítását és a kernel (másik program) meghívását a „device”-on. A kernel futása végeztével a „host” program kiolvassa a „device”-ból a kívánt eredményt.

IV-C. Implementációhoz szükséges megfontolások

A következőkben egy kisebb teljesítményű notebook videokártyát veszek alapul a megfontolások demonstrálására. Ez az nVidia GeForce 330M, 575 MHz-en futó 48 CUDA core-al, 1024GB memóriával és OpenCL 1.0 kompatibilitással. A videokártya továbbiakban fontos paraméterei a III. táblázatban látható.

III. táblázat. nVidia GeForce 330M OpenCL tulajdonságai

MAX_COMPUTE_UNITS	6
MAX_WORK_GROUP_SIZES	512 512 64
GLOBAL_MEM_SIZE	1073020928
MAX_CONSTANT_BUFFER_SIZE	65536
LOCAL_MEM_SIZE	16384

Ha a tér, ahol a laplace egyenletet meg kell oldanunk nagyon nagy, akkor érdemes szétbontani kisebb alterekre és azokhoz rendelni egy-egy „work-item”-et. Mivel a diszkrét Laplace egyenlet egy pontja a szomszédos pontokkal szoros kapcsolatban van, így az összefüggő „work-item”-eket egy „work-group”-ba érdemes szervezni, mivel így az átlapolódó pontok értékét a szomszédos „work-item”-ek is tudják írni és olvasni. Az ilyen típusú problémának méretét a MAX_WORK_GROUP_SIZES tulajdonság korlátozza.

Jelen esetben a mérési eredmény egy pontjához tartozó tér átlagosan $11 \times 11 \times 30$ pontból áll. Tehát a korábbi nem áll fenn és egyszerű megfeleltetéssel szétoszthatjuk a feladatot. A teljes tér $512 \times 512 \times 11 \times 11 \times 30$ méretű, ami 951k pont. A tárolásához single-precision mellett ennek a számnak a 4-szerese szükséges byte-okban mérve. Mivel ez a videokártyán nem áll rendelkezésre, így szétbontjuk kisebb feladatrészekre.

I. táblázat. OpenCL futási idő eredmények 12×12 mérési pontra

	Globális memória	Lokális memória, ha befér	Lokális memória bufferelés
Globális tranzakciók száma átlagosan	$12 \times 12 \times 32.3$	$12 \times 12 \times 32.3$	$12 \times 12 \times 32.3$
Lokális tranzakciók száma átlagosan	0	$0.48 \times 12 \times 12 \times 30$	$2.08 \times 12 \times 12 \times 32.3$
Futási idő	5990 ms	2530 ms	510 ms
Fajlagos futási idő	410 ms	170 ms	3.5 ms

Ezen feladatrészek méretét egy paraméter állításával lehet változtatni és az implementált algoritmus ettől generikusan függ. Emellett az interpoláció mértéke N_{ip} is paraméterrel generikusan állítható. Az algoritmus generikusságát csupán a futási időben történő dinamikus memória allokációval lehetséges megvalósítani. A korábban említettek végett (II táblázat) az allokáció csak a „host” programban történhet.

IV-D. Memória szervezés

IV-D1. Csak globális memória használata: Az algoritmus pszeudó kódjának direkt leképezése esetén a „host”-on allokálunk memóriát a „device” globális memóriájában, majd a megfelelő adatokat ide másoljuk és a kernel is itt ír és olvas. A problémát a globális memória nagy hozzáférési ideje jelenti, ami miatt sok „work-item” tétlenül a memóriára fog várakozni. Ilyenkor az egy mérési pontra vonatkoztatott szimulációs idő a referenciánál is lassabb.

IV-D2. Globális memória és adott esetben lokális memória használata: Kis erőfeszítéssel nagy javulást lehet elérni, ha a mérési ponthoz tartozó szimulációs tér éppen belefér a lokális memóriába. Tehát, mielőtt az (3) szerinti iteratív megoldót futtatnánk először a globális memóriából a lokális memóriába töltjük át a kérdéses pontokat, majd számolunk rajta és a végén visszatöltjük a globális memóriába. E javítással a referenciával azonos sebességet tudunk elérni.

IV-D3. Globális memória és minden adódó alkalomkor a lokális memória használata: Nagyobb erőfeszítést igényel, hogy minden alkalommal a globális memóriával való kommunikációt a lokális memória közbeékelésével tegyük. Ezt úgy lehet felfogni, mintha a globális memóriát lokális memória méretű kvantumokban tudnánk csak elérni. Ekkor nagy odafigyelést kíván a memóriacímzés megfelelő prgramozása, de eredményképp gyorsulás érhető el.

Összegezve elmondható, hogy az aktuálisan használt adat tárolását a lehető legközelebb kell tartani a „compute-unit”-hoz.

V. EREDMÉNYEK

V-A. MATLAB implementáció

A referenciaként szolgáló MATLAB algoritmus lineáris program-szervezést alkalmazva az elérhető fajlagos futási idő $\sim 100ms$.

A kód minimális változtatásával elérhető a párhuzamos végrehajtás. Ezt a for ciklusok Parallel Toolbox beli `parfor` utasítására cserélve érhetjük el. 4 processzormaggal rendelkező PC-n legjobb esetben a negyedére csökkenhet a futási idő. Valójában ez sose történik meg. A MATLAB Parallel Toolbox-a az egyes szimulációkat adott processzormagra osztja el. Korábban láttuk, hogy ezen szimulációk lépésgénye nagyban eltér egymástól, így előáll az a sajnálatos eset, hogy 3 mag tétlenül a negyedikre vár, ami miatt ez nem tekinthető járható útnak.

V-B. OpenCL implementáció

OpenCL keretrendszer segítségével írt programot a GPU-n futtatva a I. táblázatban látható eredményeket kapjuk. Csupán a globális

memóriát használva a referenciához képest romlik a teljesítmény. Ezt a videokártya prediktív cache nélküli kialakításának és a globális memóriájának a kiéheztetésének tudhatjuk be. A lokális memória használata a futási időt drasztikusan le tudja csökkenteni, ami a korábban ismertetett memória szervezési megfontolások helyességét igazolja.

VI. ÖSSZEGZÉS

A cikkben összefoglaltam az AFM felületi töltéssűrűség mérés-technikáját, amiben azonosítottam a kapacitás értékének kritikus voltát. Ezidáig a kapacitás értékének a [6], [3] szerinti közelítéseket tartalmazó analitikus eredményt lehetett felhasználni.

Feladatként ezen kapacitás értékét számító szimulátor építését tűztam ki, aminek elfogadható időn belül kell eredményt szolgáltatnia. A párhuzamosítás lehetősége triviálisan adódott. A hordozhatóság és a gyorsabb végrehajtás végett a szimulátort OpenCL környezetben implementáltam, ami a szimulátor heterogén multiproszessoros környezetben való futtatását lehetővé teszi.

Az eredményeket ismertetve a szimulátor futási idejében látványos gyorsulást tapasztaltam, ami az érdesebb felületek esetén is elfogadhatóan pontos eredményt tud szolgáltatni.

A szimuláció felhasználásával történő töltéssűrűség származtatása még várat magára, ugyanígy ezen származtatás validálására való mérési összeállítás kidolgozása. A szimulátor magját képező lineáris egyenletrendszer iterációs megoldó konvergenciájának bizonyítása és az alternatív direkt megoldó vizsgálata is további feladat.

HIVATKOZÁSOK

- [1] G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, „Atomic force microscope,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 56, pp. 930–933, Mar 1986. [Online]. Available: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.56.930>
- [2] B. Vasić, M. Kratzer, A. Matković, A. Nevošad, U. Ralević, D. Jovanović, C. Ganser, C. Teichert, and R. Gajić, „Atomic force microscopy based manipulation of graphene using dynamic plowing lithography,” *Nanotechnology*, vol. 24, no. 1, p. 015303, 2013. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0957-4484/24/i=1/a=015303>
- [3] H.-J. Butt, B. Cappella, and M. Kappl, „Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications,” *Surface Science Reports*, vol. 59, no. 1–6, pp. 1 – 152, 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167572905000488>
- [4] Y. Martin, C. C. Williams, and H. K. Wickramasinghe, „Atomic force microscope–force mapping and profiling on a sub 100 a scale,” *Journal of Applied Physics*, vol. 61, no. 10, pp. 4723–4729, 1987. [Online]. Available: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/61/10/10.1063/1.338807>
- [5] H.-J. Butt, „Measuring electrostatic, van der Waals, and hydration forces in electrolyte solutions with an atomic force microscope,” *Biophys J.*, vol. 60(6), p. 1438–1444., 1991. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1260203/>
- [6] S. Hudlet, M. Saint Jean, C. Guthmann, and J. Berger, „Evaluation of the capacitive force between an atomic force microscopy tip and a metallic surface,” *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 5–10, 1998. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s1005100510050219>
- [7] Khronos OpenCL Working Group, *The OpenCL Specification, version 1.0*, 6 August 2010. [Online]. Available: <http://www.khronos.org/registry/cl/specs/opencl-1.0.pdf>