

**MINISTERUL EDUCAȚIEI CULTURII ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII  
MOLDOVA**

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

**FACULTATEA CALCULATOARE, INFORMATICĂ ȘI  
MICROELECTRONICĂ**

**DEPARTAMENTUL MICROELECTRONICĂ ȘI INGINERIE BIOMEDICALĂ**

**RAPORT DE CERCETARE**

**Disciplina: INSTRUMENTAȚIE ȘI METROLOGIE PENTRU  
NANOINGINERIE**

**Tema: Informatica vs nanoingineria**

**A efectuat: st. gr. MN-251M Cimbir Cătălin**

**A verificat: prof., dr.habilitat Buzdugan Artur**

**CHIȘINĂU – 2026**

## Cuprins

---

<b>OBIECTIVUL GENERAL ȘI OBIECTIVELE SPECIFICE.....</b>	<b>- 3 -</b>
<b>1. INTRODUCERE.....</b>	<b>- 4 -</b>
1.1. Trecerea de la microelectronică la nanoelectronică și impactul direct asupra instrumentației de măsură și control.....	- 4 -
1.2. Abstracția logică, computațională și algoritmică (Informatica) în raport cu manipularea, sinteza și metrologia materiei la scară nanometrică (Nanoingineria) .....	- 4 -
<b>2. LIMITELE FIZICE ALE SILICIULUI ȘI DECUPLAREA NODULUI TEHNOLOGIC DE METRICILE REALE .....</b>	<b>- 6 -</b>
2.1 Fenomene cuantice și limitări termice în nodurile sub 3 nm .....	- 6 -
2.2 Analiza critică a nodurilor comerciale: Marketing versus Realitate Metrologică .....	- 7 -
2.3. Soluții structurale și materiale avansate furnizate de nanoinginerie.....	- 7 -
<b>3. PARADIGME DE CALCUL DE GENERAȚIE VIITOARE ȘI INSTRUMENTAȚIA DE CONTROL.....</b>	<b>- 9 -</b>
3.1. Calculul Cuantic și instrumentația asociată.....	- 9 -
3.2. Calculul Neuromorfic și Electronica Memristivă .....	- 10 -
<b>4. NANOINFORMATICA ȘI METROLOGIA COMPUTAȚIONALĂ .....</b>	<b>- 11 -</b>
4.1. Modelarea atomică și simularea <i>In Silico</i> .....	- 11 -
4.2. Integrarea Inteligenței Artificiale în Nanoinginerie .....	- 11 -
<b>5. CONCLUZII.....</b>	<b>- 13 -</b>
5.1. Sinteza interdependenței dintre software și hardware la nivel atomic .....	- 13 -
5.2. Sinteza interdependenței .....	- 13 -
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>- 15 -</b>

## OBIECTIVUL GENERAL ȘI OBIECTIVELE SPECIFICE

---

Prezentul referat își propune să realizeze o evaluare sistematică a modului în care limitările materiale identificate la nivel atomic reconfigurează strategiile de dezvoltare din știința calculatoarelor. În era post-Moore (2021–2026), performanța aplicațiilor software nu mai poate fi îmbunătățită exclusiv prin creșterea frecvenței de ceas a procesoarelor sau prin reducerea bidimensională a topologiei circuitelor integrate. Prin urmare, lucrarea urmărește să detalieze punctele de convergență unde cele două discipline își condiționează reciproc progresul.

Un prim obiectiv corelat constă în analizarea fenomenului de decuplare a nodurilor tehnologice comerciale de dimensiunile lor fizice reale. Această secțiune va demonstra cum instrumentația de măsură și control relevă diferențele majore dintre denumirile de marketing ale proceselor de fabricație și structura geometrică măsurată la microscopul electronic. Înțelesul acestei discrepanțe este fundamental pentru inginerii software care proiectează compilatoare și sisteme de operare, deoarece aceștia trebuie să gestioneze comportamente fizice complexe (cum ar fi disiparea termică neuniformă sau curenții de scurgere) ascunse în spatele unor indici de performanță abstracți.

Al doilea obiectiv major vizează investigarea noilor paradigme hardware furnizate de nanoinginerie (calculul cuantic și cel neuromorfic) și a modului în care acestea rescriu teoria algoritmică. Se va pune un accent deosebit pe rolul instrumentației metrologice în caracterizarea acestor sisteme, evidențiind modul în care măsurătorile de precizie la temperaturi criogenice sau analiza variațiilor de rezistență din memristori influențează direct ratele de eroare logică pe care software-ul trebuie să le corecteze.

În cele din urmă, lucrarea își propune să definească conceptul de nanoinformatică, demonstrând cum algoritmi moderni de Machine Learning și simulările in silico devin unelte de lucru pentru nanoingineri. Prin această abordare, referatul va demonstra că relația dintre cele două domenii nu este una unidirecțională, ci reprezintă o buclă de co-design în care informatica oferă uneltele predictive pentru sinteza materialelor, iar nanoingineria livrează substratul fizic capabil să execute instrucțiunile logice la viteze superioare [1].

# 1. INTRODUCERE

---

## 1.1. Trecerea de la microelectronică la nanoelectronică și impactul direct asupra instrumentației de măsură și control

Paradigmele computaționale contemporane traversează o etapă de reconfigurare structurală determinată de atingerea limitelor fundamentale ale fizicii clasice în tehnologia semiconductorilor. Timp de peste jumătate de secol, evoluția sistemelor de calcul a fost ghidată de scalarea geometrică dimensională, un proces predictibil care a permis integrarea unui număr exponențial de componente active pe unitatea de suprafață. În prezent, această tranziție de la microelectronică la nanoelectronică nu reprezintă doar o simplă reducere a scării de fabricație, ci o schimbare de regim fizic, unde proprietățile macroscopice ale materialelor sunt înlocuite de fenomene cuantice de suprafață și de transport balistic al purtătorilor de sarcină.

La scară nanometrică, comportamentul dispozitivelor semiconductoare devine dependent de configurațiile atomice locale și de imperfecțiunile structurale de ordin sub-nanometric. Această realitate fizică impune o revizuire radicală a instrumentației utilizate în procesele de diagnosticare, calibrare și control al producției. Sistemele metrologice tradiționale, bazate pe tehnici optice limitate de pragul de difracție, devin ineficiente pentru evaluarea geometrică și funcțională a structurilor trimerice cu dimensiuni critice inferioare lungimilor de undă din spectrul vizibil sau ultraviolet apropiat.

Prin urmare, nanoelectronica a determinat dezvoltarea unei noi clase de instrumentație avansată. Echipamentele moderne de analiză, precum microscopia de forță atomică (AFM) tridimensională sau microscopia electronică de scanare prin transmisie (STEM), nu mai sunt exclusiv unelte de laborator destinate cercetării fundamentale, ci au fost integrate direct în fluxurile industriale de control al proceselor (in-line metrology). Din această perspectivă, succesul noilor arhitecturi de calcul dezvoltate de informatică este condiționat direct de precizia instrumentației analitice. Abilitatea de a măsura, stoca și prelucra datele metrologice cu incertitudini de ordinul picometrilor reprezintă factorul determinant în asigurarea reproductibilității și a randamentului de fabricație pentru întreaga industrie IT globală [2].

## 1.2. Abstracția logică, computațională și algoritmică (Informatica) în raport cu manipularea, sinteza și metrologia materiei la scară nanometrică (Nanoingineria)

Înțelegerea dinamicii actuale a sistemelor de calcul impune delimitarea și, ulterior, analiza intersecției dintre două paradigme științifice fundamentale: informatica și nanoingineria. Aceste domenii operează la niveluri de abstracție complet diferite, însă evoluția lor a devenit convergentă din cauza limitărilor fizice ale suportului hardware. Informatica, în esența ei teoretică și aplicată, se bazează pe principiul separării nivelurilor de abstracție. Această știință tratează procesarea informației independent de substratul fizic care execută operațiile logice. Obiectul de studiu al informaticii include arhitecturile de calcul (cum ar fi modelul clasic von Neumann), structurile de date, complexitatea algoritmică și dezvoltarea de sisteme software. Pentru un arhitect software sau un programator, unitatea elementară de operare este bitul logic (0 sau 1), o entitate matematică discretă guvernată

de regulile algebrei booleene. În această paradigmă, codul sursă este compilat și optimizat sub presupunerea că hardware-ul de bază execută instrucțiunile în mod determinist, fără erori induse de fluctuațiile mediului fizic înconjurător[3].

La polul opus, nanoingineria se concentrează pe manipularea directă, sinteza și controlul materiei la scară atomică și moleculară, operând în mod uzual în intervalul dimensional cuprins între 1 nm și 100 nm. În acest domeniu, comportamentul materialelor nu mai este guvernat de ecuațiile fizicii macroscopice, ci de legile mecanicii cuantice. Un nanoinginer nu lucrează cu abstracții matematice, ci cu entități fizice reale: funcții de undă ale electronilor, rețele cristaline de siliciu, interfețe atomice și structuri moleculare complexe. Metodologiile sale includ tehnici avansate de litografie și auto-asamblare chimică, dublate de sisteme riguroase de metrologie fără de care vizualizarea sau verificarea structurilor create ar fi imposibilă.

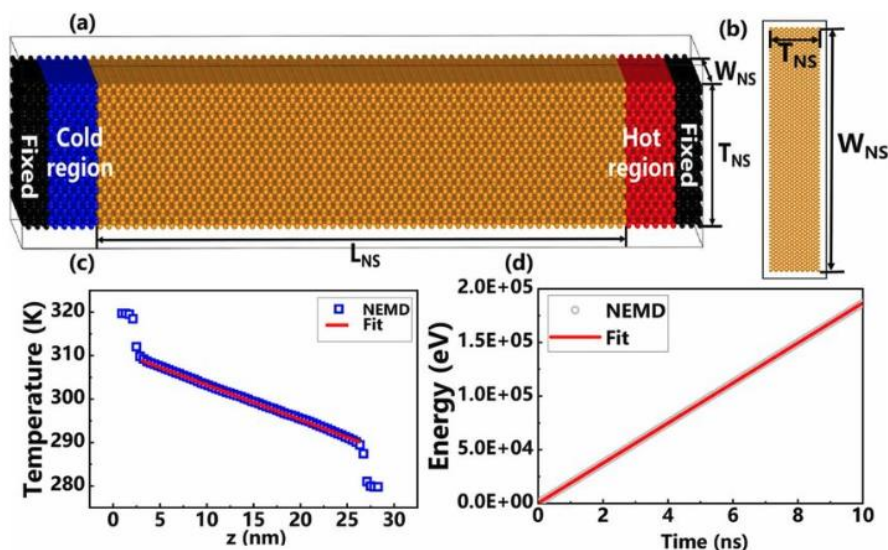
Decalajul și, totodată, punctul de contact dintre cele două discipline apar în momentul în care elementele logice din informatică trebuie transpuse fizic în structuri nanometrice. Când lungimea de canal a unui tranzistor scade sub ordinul câtorva zeci de atomi, abstracția informatică a bitului determinist se prăbușește. În acest punct, nanoingineria intervine pentru a stabiliza suportul fizic prin reconfigurări de materiale și geometrii tridimensionale, oferind informaticii un nou set de reguli hardware. Studiul disciplinei de Instrumentație și Metrologie devine elementul de legătură dintre aceste domenii: instrumentele metrologice colectează date fizice brute de la nanoscară, iar algoritmi informatici procesează acest volum masiv de informații pentru a calibra procesul de producție, închizând astfel o buclă de feedback tehnologic modern [4].

## 2. LIMITELE FIZICE ALE SILICIULUI ȘI DECUPLAREA NODULUI TEHNOLOGIC DE METRICILE REALE

### 2.1 Fenomene cuantice și limitări termice în nodurile sub 3 nm

Procesul de scalare geometrică a dispozitivelor semiconductoare pe bază de siliciu a intrat într-un regim critic odată cu trecerea sub pragul dimensional de 3 nm. La aceste dimensiuni, care corespund unei grosimi de ordinul a doar câțiva atomi de siliciu, mecanismele fizicii clasice care guvernau transportul purtătorilor de sarcină în microelectronică sunt înlocuite de fenomene specifice mecanicii cuantice. Cel mai disruptiv fenomen identificat în structurile ultra-scalate este efectul de tunelare cuantică directă prin bariera de potențial a porții dielectrice și de-a lungul canalului tranzistorului. Acest comportament determină ca electronii să traverseze barierele izolatoare în mod probabilistic, generând curenți de scurgere masivi în stare de blocare (off-state leakage currents). Din perspectivă metrologică, acești curenți paraziți nu mai pot fi tratați ca simple zgomote de fond, ci reprezintă o componentă majoră a comportamentului electric complex pe care modelele informatice trebuie să o anticipeze.

Pe lângă limitările de ordin cuantic, efectele termice la nanoscară au devenit principalul factor restrictiv în creșterea frecvenței de lucru a unităților de procesare, figura 1.



**Figura 1.** (a) Diagramă schematică a sistemelor de simulare. (b) Secțiunea transversală a sistemelor de simulare. (c) Profiluri de temperatură de-a lungul direcției fluxului de căldură și (d) variația cumulativă a energiei în funcție de timp.

Disiparea densității de putere pe unitatea de suprafață în nodurile sub 3 nm suferă de o asimetrie severă, generând puncte termice locale (hotspots) la nivelul nanostructurilor tranzistorului. Conductivitatea termică a siliciului scade drastic la dimensiuni nanometrice din cauza împrăștierii fononilor la interfețele structurale, un fenomen documentat intens în studiile recente. Această acumulare termică neuniformă alterează mobilitatea purtătorilor de sarcină și accelerează mecanismele de degradare structurală, cum ar fi electromigrarea. Pentru disciplina de

instrumentație și metrologie, această realitate fizică a reconfigurat cerințele de testare: caracterizarea unui nanodispozitiv modern nu se mai poate rezuma la măsurători geometrice statice, ci necesită tehnici de metrologie electro-termică dinamică în timp real, capabile să coreleze fluctuațiile termice atomice cu erorile logice care se propagă în straturile software superioare [5].

## **2.2 Analiza critică a nodurilor comerciale: Marketing versus Realitate Metrologică**

O provocare majoră în procesul actual de calibrare și standardizare din industria nanoelectronică este reprezentată de decuplarea completă a denumirilor comerciale ale nodurilor tehnologice de dimensiunile fizice reale ale structurilor integrate. Din punct de vedere istoric, până la nivelul microelectronicii din anii 1990, indicarea unui nod tehnologic (cum ar fi 130 nanometri) corespundea în mod direct cu lungimea reală a porții tranzistorului (gate length). În nanoelectronica modernă însă, denumiri precum 3 nanometri sau 2 nanometri nu mai reflectă nicio dimensiune geometrică unică de pe cip, ci reprezintă indici de marketing utilizați pentru a sugera o eficiență energetică echivalentă sau o densitate teoretică de integrare. Pentru disciplina de instrumentație și metrologie, această discrepanță impune utilizarea unor tehnici avansate de reverse engineering și metrologie structurală pentru a determina parametri reali de funcționare. Măsurătorile de înaltă precizie realizate prin microscopie electronică de scanare prin transmisie (STEM) pe cipuri comerciale de ultimă generație relevă faptul că elementele geometrice cheie au dimensiuni considerabil mai mari decât sugerează numele nodului. De exemplu, în cadrul unui proces de fabricație etichetat comercial drept 3 nanometri, pasul real al aripioarelor de siliciu (fin pitch) măsoară de obicei între 20 și 30 nanometri, în timp ce pasul contactelor metalice (contacted poly pitch) depășește valoarea de 40 nanometri.

Această realitate metrologică este esențială pentru informatică și pentru ingineria sistemelor de calcul. Compilatoarele moderne și algoritmi de gestionare a puterii din sistemele de operare sunt proiectați pe baza unor modele abstracte furnizate de producători. Dacă aceste modele nu sunt corelate prin analize metrologice cu dimensiunile fizice reale, apar erori severe de predicție a comportamentului termic și electric. Instrumentația modernă de măsură are rolul de a mapa aceste dimensiuni geometrice reale și de a transmite datele către modelele de simulare software, asigurând astfel optimizarea corectă a codului executabil în raport cu limitările fizice reale ale siliciului, și nu cu specificațiile nominale din broșurile comerciale [6].

## **2.3. Soluții structurale și materiale avansate furnizate de nanoinginerie**

Limitările fizice severe ale siliciului ultra-scalat au impus o schimbare radicală de strategie în rândul nanoinginerilor, trecându-se de la simpla reducere a dimensiunilor geometrice la reconfigurarea tridimensională a dispozitivelor și la integrarea unor materiale cu proprietăți electronice superioare. În arhitecturile

microelectronice standard, controlul canalului de conducție se realiza bidimensional. Începând cu perioada 2021-2026, producția de masă a semiconductorilor a adoptat pe deplin tehnologia tranzistorilor cu porți înconjurate, cunoscuți sub denumirea de Gate-All-Around Field-Effect Transistor (GAAFET) sau structuri Nanosheet. Această configurație geometrică suspendă canalele de siliciu sub formă de nanofile sau nanofâșii suprapuse vertical, permițând porții metalice să înconjoare complet canalul pe toate cele patru laturi. Din perspectiva disciplinei de instrumentație și metrologie, tranziția către structurile Nanosheet a generat o creștere exponențială a complexității proceselor de inspectare. Spre deosebire de generațiile anterioare de tip FinFET, unde profilul geometric putea fi scanat parțial de la suprafață, structurile GAAFET prezintă cavități interioare ascunse (inner gates). Măsurarea grosimii straturilor atomice depuse în aceste cavități nu mai poate fi realizată prin microscopie de forță atomică (AFM) convențională, deoarece sonda fizică nu poate pătrunde sub straturile suspendate. Acest blocaj instrumental a determinat dezvoltarea metrologiei prin împrăștiere de raze X (Critical Dimension Small-Angle X-ray Scattering - CD-SAXS) și a elipsometriei spectroscopice asistate de modele matematice de reconstrucție computațională. Aceste tehnici colectează spectrele de reflexie și utilizează algoritmi informatici avansați pentru a deduce geometria internă a nanosheet-ului cu o precizie de sub 0.1 nanometri.

Paralel cu inovația geometrică, nanoingineria explorează intens implementarea materialelor bidimensionale, cu o grosime de un singur atom, destinate să înlocuiască complet siliciul în canalele de transport. Materialele din familia dicalcogenidelor metalelor de tranziție, cum este disulfura de molibden (MoS<sub>2</sub>), prezintă o mobilitate excepțională a purtătorilor de sarcină chiar și la grosimi atomice, reducând curenții de scurgere la valori aproape de zero. De asemenea, nanotuburile de carbon sunt utilizate pentru a construi canale de tranzistori cu transport balistic, unde electronii traversează structura fără a suferi ciocniri cu rețeaua cristalină, minimizând disiparea termică. Integrarea acestor nanomateriale reconfigurează profund legătura cu informatica: noile caracteristici electrice de comutație permit proiectarea unor circuite logice care funcționează la tensiuni mult mai mici, oferind arhitecților software posibilitatea de a rula algoritmi complecși de inteligență artificială direct pe cipuri cu consum energetic redus [7].

### **3. PARADIGME DE CALCUL DE GENERAȚIE VIITOARE ȘI INSTRUMENTAȚIA DE CONTROL**

---

#### **3.1. Calculul Cuantic și instrumentația asociată**

Interdependența Epuizarea potențialului de scalare al tranzistorilor clasici pe bază de siliciu a accelerat tranziția către paradigme computaționale non-booleene. Printre acestea, calculul cuantic reprezintă o schimbare radicală de arhitectură, înlocuind bitul deterministic cu qubitul (bitul cuantic). Spre deosebire de sistemele informatice tradiționale, unde stările logice zero și unu sunt mutual exclusive, mecanica cuantică permite qubitului să existe într-o stare de superpoziție liniară a ambelor valori, conform ecuațiilor de undă fundamentale. Această proprietate, dublată de fenomenul de inseparabilitate cuantică (entanglement), oferă sistemelor de calcul o capacitate de procesare paralelă masivă, capabilă să rezolve probleme de optimizare complexă sau criptografie care ar necesita secole de rulare pe cele mai avansate supercalculatoare clasice.

Realizarea fizică a acestor arhitecturi abstracte reprezintă însă un triumf al nanoingineriei și o provocare extremă pentru disciplina de instrumentație și metrologie. Qubiții pot fi implementați hardware prin diverse tehnologii, cele mai proeminente fiind joncțiunile Josephson supraconductoare, capcanele de ioni și punctele cuantice semiconductoare (quantum dots) integrate în structuri de siliciu purificat izotopic. Fiecare dintre aceste abordări hardware funcționează la nivel de atom individual sau pereche de electroni, ceea ce le face extrem de sensibile la zgomotul ambiental magnetic, electric sau termic. Chiar și o interacțiune minoră cu mediul înconjurător distruge starea de superpoziție, un fenomen critic numit decoerență cuantică, care induce erori masive în execuția algoritmilor software.

Pentru a preveni decoerența, instrumentația de control asociată calculului cuantic trebuie să opereze în condiții de mediu extreme, controlate metrologic. Qubiții supraconductori necesită sisteme de criogenie avansată, cum sunt criostatele de diluție (dilution refrigerators), care mențin mediul de lucru la temperaturi de aproximativ 10 milikelvin, o valoare mai coborâtă decât cea din spațiul cosmic profund. Metrologia în aceste medii criogenice nu se mai poate baza pe senzori termici clasici, ci utilizează termometrie de zgomot primar și reflectometrie de radiofrecvență de mare viteză pentru a citi stările cuantice fără a introduce energie termică parazită în sistem. Din această perspectivă, sarcina informaticii moderne s-a mutat din zona algoritmilor puri în zona straturilor software de corecție a erorilor cuantice (Quantum Error Correction - QEC). Algoritmii QEC trebuie să ruleze în timp real pe arhitecturi clasice de tip FPGA conectate la criostat, preluând datele metrologice analogice transmise din interiorul cipului cuantic, interpretând zgomotul și corectând erorile fizice înainte ca acestea să corupă calculul logic [8].

### 3.2. Calculul Neuromorfic și Electronica Memristivă

Deși O altă paradigmă computațională disruptivă care redefinește granița dintre informatică și nanoinginerie este calculul neuromorfic. Arhitecturile de calcul convenționale, bazate pe modelul von Neumann, suferă de o limitare structurală majoră cunoscută sub numele de „gâtul de gâtuire von Neumann” (von Neumann bottleneck). Această ineficiență este cauzată de separarea fizică dintre unitatea centrală de procesare (CPU) și memoria sistemului, transferul continuu de date între cele două componente generând o latență ridicată și un consum masiv de energie electrică. Calculul neuromorfic rezolvă această problemă prin imitarea organizării biologice a creierului uman, unde procesarea și stocarea informației au loc simultan în același punct fizic: sinapsa.

Realizarea hardware a acestor rețele neuronale artificiale este complet dependentă de capacitatea nanoingineriei de a fabrica și caracteriza dispozitive memristive (memristori). Un memristor este un element de circuit pasiv cu două terminale a cărui rezistență electrică depinde de istoricul tensiunilor sau curenților care l-au traversat anterior. Din punct de vedere structural, un memristor la nanoscară este compus dintr-un strat ultra-subțire de oxid metalic (cum ar fi oxidul de hafniu sau oxidul de titan), cu o grosime de doar câțiva nanometri, intercalat între doi electrozi metalici. Aplicarea unui impuls electric determină migrarea ionilor de oxigen și formarea unor filamente conductoare microscopice prin stratul de oxid, modificând conductanța dispozitivului într-un mod analog cu plasticitatea sinaptică biologică. Integrarea memristorilor în matrice de tip crossbar (crossbar arrays) permite executarea directă în hardware a operațiilor matematice de înmulțire matriceală-vectorială, care stau la baza algoritmilor de inteligență artificială și deep learning. Totuși, implementarea industrială a acestor sisteme se lovește de bariere metrologice severe.

În cadrul disciplinei de instrumentație și metrologie, caracterizarea rețelelor memristive reprezintă o provocare din cauza variabilității intrinseci a dispozitivelor. Deoarece formarea și ruperea filamentelor conductoare la nivel atomic sunt procese parțial stochastice (probabilistice), memristorii prezintă fluctuații ale rezistenței de la un ciclu de funcționare la altul (cycle-to-cycle variation) și de la un dispozitiv la altul (device-to-device variation). Instrumentația modernă de măsură trebuie să utilizeze sisteme de testare electrică ultratransitorie și microscopie de forță atomică cu conducție electrică (C-AFM) pentru a mapa dinamica acestor filamente fără a distruge stările programate. Informaticienii trebuie să preia aceste date metrologice privind ratele de variație fizică pentru a dezvolta algoritmi software toleranți la defecte, capabili să ruleze rețele neuronale de mare precizie pe un hardware memristiv afectat de zgomot structural atomic [9].

## 4. NANOINFORMATICA ȘI METROLOGIA COMPUTAȚIONALĂ

---

### 4.1. Modelarea atomică și simularea *In Silico*

Abordarea tradițională în nanoinginerie, bazată pe experimente succesive de tip încercare și eroare în camere curate, a devenit extrem de costisitoare și ineficientă din cauza complexității structurilor sub-nanometrice. În acest context, nanoinformatica intervine ca o disciplină hibridă care utilizează puterea de calcul pentru a modela și prezice comportamentul materiei înainte ca aceasta să fie sintetizată fizic. Această metodologie de proiectare și testare virtuală, cunoscută sub denumirea de simulare in silico, permite cercetătorilor să exploreze proprietățile electronice, optice și mecanice ale noilor nanomateriale direct din ecuațiile fundamentale ale fizicii atomice.

Principala metodă utilizată în modelarea atomică modernă (2021-2026) este Teoria Funcționalei de Densitate (Density Functional Theory - DFT). DFT este o metodă de mecanică cuantică folosită pentru a investiga structura electronică a sistemelor cu mai mulți corpi, în special atomi, molecule și faze condensate. În loc să încerce să rezolve ecuația multiparticulă complexă a lui Schrödinger pentru fiecare electron individual, un demers imposibil din punct de vedere computațional din cauza creșterii exponențiale a variabilelor, DFT utilizează densitatea electronică spațială ca funcție fundamentală. Paralel cu DFT, simulările de Dinamică Moleculară (MD) sunt folosite pentru a studia mișcarea fizică a atomilor și moleculelor pe o durată determinată de timp, oferind o perspectivă dinamică asupra modului în care rețelele cristaline de siliciu sau materialele bidimensionale interacționează sub stres termic sau mecanic.

Cu toate acestea, modelarea in silico se lovește de bariere severe de scalabilitate computațională. Chiar și cu aproximațiile matematice introduse de DFT, calcularea stărilor energetice pentru o structură care conține doar câteva mii de atomi (cum este canalul unui tranzistor modern Nanosheet) necesită resurse gigantice de calcul și rularea pe supercomputere timp de mai multe zile. Din acest motiv, disciplina de instrumentație și metrologie are un rol critic în calibrarea acestor modele: datele geometrice și electrice reale, colectate prin microscopie electronică sau elipsometrie, sunt folosite pentru a valida și ajusta parametrii inițiali ai simulărilor software. Fără această corelație permanentă cu datele metrologice empirice, simulările computaționale riscă să devină modele pur teoretice, decuplate de realitatea fizică din fabricile de semiconductori [10].

### 4.2. Integrarea Inteligenței Artificiale în Nanoinginerie

Volumul masiv de date brute generat de instrumentația metrologică modernă a depășit capacitatea de analiză a metodelor statistice tradiționale. În perioada 2022-2026, o tendință majoră în metrologia nanoelectronică a devenit integrarea algoritmilor de Machine Learning (ML) și a rețelelor neuronale artificiale direct în sistemele de achiziție de date ale echipamentelor de scanare. Această fuziune dintre software-ul inteligent și hardware-ul de măsură a dat naștere metrologiei asistate de inteligență artificială, un domeniu în care informatica nu mai este doar un instrument de stocare, ci devine o componentă activă a procesului de măsurare.

O aplicație critică a acestor tehnici se regăsește în procesarea imaginilor obținute prin Microscopia de Forță Atomică (AFM) și Microscopia Electronică de Scanare (SEM). Imaginile capturate la rezoluții sub-nanometrice sunt în mod inerent afectate de zgomot de fond (zgomot termic, vibrații mecanice ale sondei) și de artefacte geometrice cauzate de uzura vârfului acului de scanare. Prin antrenarea unor rețele neuronale convoluționale (CNN) pe mii de profile atomice ideale, software-ul poate rula algoritmi de filtrare predictivă și reconstrucție tridimensională a imaginii în timp real. Aceste sisteme software de nanoinformatică elimină automat aberațiile geometrice și reconstruiesc profilul real al tranzistorilor nanosheet cu o incertitudine statistică redusă drastic, operând corecții pe care nicio lentilă fizică sau sondă mecanică nu le-ar putea realiza la nivel hardware. În plus, algoritmi de învățare automată sunt utilizați pentru automatizarea completă a inspecției în fabricile de semiconductori (automated defect classification). În loc ca un operator uman să analizeze manual sute de imagini STEM pentru a identifica dislocări în rețeaua cristalină de siliciu sau goluri în straturile microscopice de oxid, algoritmi de computer vision scanează fluxul de date în milisecunde. Aceștia pot detecta abateri dimensionale de ordinul picometrilor în pasul aripioarelor unui tranzistor, trimițând imediat un semnal de calibrare înapoi la echipamentele de litografie. Această buclă de feedback reprezintă esența simbiozei actuale dintre informatică și nanoinginerie: algoritmi informatici avansați devin singurele instrumente capabile să interpreteze și să corecteze erorile fizice pe care nanoingineria le întâmpină la scară atomică [11].

## 5. CONCLUZII

---

### 5.1. Sinteza interdependenței dintre software și hardware la nivel atomic

Tranziția tehnologică de la microelectronică la nanoelectronică, documentată pe parcursul acestei lucrări, a demonstrat că izolarea tradițională dintre straturile de abstracție ale informaticii și structurile fizice ale nanoingineriei nu mai este sustenabilă. Atunci când dimensiunile critice ale canalelor tranzistorilor scad sub pragul de 3 nanometri, fenomenele fizicii cuantice (cum ar fi efectul de tunelare directă) și limitările de disipare termică degradează comportamentul determinist pe care s-a construit întreaga teorie a algoritmilor booleani. Din această perspectivă, hardware-ul nu mai poate fi privit de către inginerii software ca un mediu ideal și lipsit de erori de execuție.

Analiza realizată evidențiază faptul că instrumentația modernă de măsură și control acționează ca un canal de legătură bidirecțional între cele două domenii. Pe de o parte, echipamentele avansate de nanometrologie precum Microscopia de Forță Atomică (AFM) sau spectroscopia cu raze X colectează date fizice brute esențiale pentru calibrarea proceselor industriale de producție și pentru demascarea diferențelor majore dintre indicii de marketing și topologia geometrică reală a cipului. Pe de altă parte, volumul masiv și zgomotul inerent al datelor metrologice au impus intervenția informaticii prin soluții de metrologie computațională. Algoritmii de Machine Learning și rețelele neuronale au devenit componente active ale instrumentației, fiind singurele unelte capabile să reconstruiască tridimensional profilele atomice și să clasifice automat defectele de rețea.

În cele din urmă, apariția noilor paradigme de calcul, cum sunt calculul cuantic criogenic și cel neuromorfic bazat pe matrice memristive stochastice, confirmă nașterea unei bucle globale de co-design. În această nouă eră, informatica preia rolul de a gestiona imperfecțiunile fizice de la nanoscară prin straturi software inteligente de corecție a erorilor și algoritmi toleranți la defecte structurale. În concluzie, viitorul sistemelor de calcul de înaltă performanță nu mai depinde de evoluția independentă a unei singure discipline, ci de capacitatea de a unifica abstracția logică a programării cu manipularea și metrologia riguroasă a materiei la scară atomică [12].

### 5.2. Sinteza interdependenței

Direcțiile strategice de dezvoltare dincolo de anul 2026 indică o accelerare a cercetărilor în domeniul nanoinformaticii, cu accent pe trecerea de la sistemele de calcul eterogene la sisteme complet integrate la scară moleculară. O primă perspectivă majoră o reprezintă maturizarea industrială a integrării tridimensionale de tip monolitic (3D Monolithic Integration). Această tehnologie permite suprapunerea verticală directă a straturilor logice (CPU) peste cele de memorie (RRAM/Memristori) prin conexiuni nanometrice ultra-dense, scurtând distanțele fizice de transmisie a datelor la nivelul câtorva zeci de atomi. Din perspectiva instrumentației, această evoluție va impune înlocuirea metrologiei distructive de secțiune cu tehnici de tomografie computerizată cu raze X de înaltă rezoluție (X-ray nano-CT), capabile să inspecteze defectele interne ale cipurilor etajate fără a le fragmenta structural [13].

O a doua direcție de cercetare emergentă este reprezentată de utilizarea modelelor generative de Inteligență Artificială pentru designul invers al materialelor (Inverse Materials Design). În loc ca nanoinginerii să încerce combinații chimice aleatorii în laborator, algoritmi de nanoinformatică vor primi setul de proprietăți electrice dorite de la nivel software (de exemplu, o anumită viteză de comutație și o disipare termică minimă), iar rețelele neuronale vor genera automat configurația atomică ideală a cristalului sau a materialului bidimensional necesar.

Această abordare reconfigurează profund rolul disciplinei de instrumentație și metrologie. Echipamentele de măsură nu vor mai fi folosite doar pentru a constata calitatea unui produs finit, ci vor alimenta continuu cu date de calibrare modelele de deep learning, transformând procesul de fabricație într-un ecosistem complet autonom și ghidat empiric de date. Studiul integrat al acestor fenomene rămâne condiția fundamentală pentru depășirea barierelor fizice ale siliciului și deschiderea unor noi orizonturi în informatica cuantică și moleculară globală [14].

## BIBLIOGRAFIE

---

- [1] M. A. Breton, D. Schmidt, A. Greene, J. Frougier, și N. Felix, „Review of nanosheet metrology opportunities for technology readiness”, *J. MicroNanopatterning Mater. Metrol.*, vol. 21, nr. 2, p. 021206, apr. 2022, doi: 10.1117/1.JMM.21.2.021206.
- [2] „IRDS”. Data accesării: 28 mai 2026. [Online]. Disponibil la: <https://irds.ieee.org/>
- [3] „IEEE Xplore: IEEE Transactions on Electron Devices”. Data accesării: 29 mai 2026. [Online]. Disponibil la: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=16>
- [4] „IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits & Systems (TCAD) | IEEE CEDA”. Data accesării: 28 mai 2026. [Online]. Disponibil la: <https://ieeecedda.org/publications/tcad>
- [5] S. Mounika și U. Nanda, „Scaling impact and performance evaluation of DIB-TreeFET for sub-3 nm digital applications”, *J. Comput. Electron.*, vol. 25, nr. 1, p. 25, dec. 2025, doi: 10.1007/s10825-025-02471-7.
- [6] „From atom to device multi-scale electro-thermal analysis of self-heating impacts in bulk vs SOI NSFETs for sub-3 nm technology node | Request PDF”, *ResearchGate*, apr. 2026, Data accesării: 29 mai 2026. [Online]. Disponibil la: [https://www.researchgate.net/publication/403902909\\_From\\_atom\\_to\\_device\\_multi-scale\\_electro-thermal\\_analysis\\_of\\_self-heating\\_impacts\\_in\\_bulk\\_vs\\_SOI\\_NSFETs\\_for\\_sub-3\\_nm\\_technology\\_node](https://www.researchgate.net/publication/403902909_From_atom_to_device_multi-scale_electro-thermal_analysis_of_self-heating_impacts_in_bulk_vs_SOI_NSFETs_for_sub-3_nm_technology_node)
- [7] T. Shohjoh *et al.*, „Inspection and metrology challenges for 3 nm node devices and beyond”, dec. 2021, p. 3.3.1-3.3.4. doi: 10.1109/IEDM19574.2021.9720711.
- [8] A. Laucht *et al.*, „Roadmap on quantum nanotechnologies”, *Nanotechnology*, vol. 32, nr. 16, p. 162003, apr. 2021, doi: 10.1088/1361-6528/abb333.
- [9] T. Jin, J. Gao, Y. Wang, și W. Chen, „Flexible neuromorphic electronics based on low-dimensional materials”, *Sci. China Mater.*, vol. 65, nr. 8, pp. 2154-2159, aug. 2022, doi: 10.1007/s40843-021-1979-3.
- [10] G. Mancardi *et al.*, „A computational view on nanomaterial intrinsic and extrinsic features for nanosafety and sustainability”, *Mater. Today*, vol. 67, pp. 344-370, iul. 2023, doi: 10.1016/j.mattod.2023.05.029.
- [11] „(PDF) Scanning probe microscopy in the age of machine learning”, *ResearchGate*, mar. 2026, doi: 10.1063/5.0160568.
- [12] D. Mallick *et al.*, „Next-generation electronics by co-design with chalcogenide materials”, *Npj Spintron.*, vol. 3, nr. 1, p. 41, oct. 2025, doi: 10.1038/s44306-025-00106-y.
- [13] „X-ray metrology for advanced semiconductor manufacturing of next-generation logic devices | Request PDF”, *ResearchGate*, ian. 2026, doi: 10.1117/1.JMM.25.1.010901.
- [14] Q. Ma *et al.*, „The next-generation polymer composite revolution: AI-driven multi-functional polymer composite for intelligent additive manufacturing”, *Rev. Mater. Res.*, p. 100229, mai 2026, doi: 10.1016/j.revmat.2026.100229.