

Electronica funcțională la apropierea de limitele miniaturizării electronice prezise de Legea lui Moore

Dr. ing. Constantin Bulucea^{*)}

Membru de Onoare al Academiei Romane

Rezumat

Autorul completeaza lucrarea inclusa in volumul dedicat vietii si operei Academicianului Mihai Draganescu cu reflexii inedite asupra contributiilor in domeniul electronicii functionale. Diferite scenarii posibile ale evolutiei tehnicii electronice sunt discutate in contextul apropierii de limitele miniaturizarii electronicii clasice prezise de Legea lui Moore si a unei posibile continuari ale miniaturizarii pe baza de electronica functionala.

^{*)} IEEE Fellow, National Semiconductor Corporation, 2900 Semiconductor Drive, Santa Clara, CA 95052, USA

1. Introducere

In lucrarea inclusa in volumul lucrarilor prezentate la sesiunea Academiei Romane *Știința, Tehnologia și Filosofia Informației în Opera și Viața Acad. Mihai Drăgănescu*, am analizat activitatea si opera Academicianului Draganescu, furnizand elemente documentare cunoscute personal, ca lucrator si conducator in industria de electronica a Romaniei anilor 1966-1986 si apoi ca observator al evolutiei acesteia [1]. Nota de fata completeaza lucrarea referita cu o discutie asupra contributiilor in domeniul electronicii functionale si a rolului potential al acestei tehnici in dezvoltarea miniaturizarii electronicii in continuare, dincolo de limitele Legii lui Moore.

2. Contributiile in Domeniul Electronicii Functionale

Perioada de peste patru decenii in care a activat Academicianul Mihai Draganescu a cuprins in ea inceputurile, cresterea si apropierea de apogeul electronicii clasice, adica a electronicii construite din componente identificabile ca tranzistoare, diode, etc. Cresterea fiind practic exponentiala, apropierea de limitele fizice a fost inevitabila. La editia 2003 a conferintei ISSCC de la San Francisco, Dr. Gordon Moore, cel care in urma cu 40 ani a formulat curajos legea miniaturizarii electronice, nu a mai prelungit, nici cel putin cu o corectie de panta, linia semilogaritmica din doua segmente drepte a *Legii lui Moore*, mentionand ca “nici o *exponentiala nu exista vesnic*”, dar adaugand ca sfarsitul poate fi “*intarziat vesnic*”. Revenind la linia pragmatica a prezicerilor initiale, Gordon Moore a concluzionat ca miniaturizarea conventinuala, esential in tehnica CMOS pe siliciu, va mai continua pe o durata de 10 +/- 2 ani. [2]. Un an fiind trecut, mai raman numai 9 ani de electronica clasica, dupa aceste preziceri.

Generatia Academicianului Draganescu a fost binecuvantata cu oportunitati de crestere extraordinare si de contribuire directa la crearea si dezvoltarea unei tehnici care nu numai ca a fost fascinanta in ea insasi, dar, prin calculatoarele personale (PC) care au putut fi realizate pe baza ei, a influentat si chiar determinat cursul dezvoltarii civilizatiei umane. Aceasta generatie a avut privilegiul de a fi trait toate fazele dezvoltarii explosive a electronicii, de la amplificatorul cu o singura trioda pana la microprocesoarele cu zeci de milioane de tranzistoare integrate monolitice. Nu este inca clar daca acelasi lucru se va putea spune despre generatiile de ingineri

electronisti care vor urma. In contextul *comoditizarii* produselor electronice si al *globalizarii* productiei acestora, se discuta deja daca profesia de inginer de electronica va fi la fel de atragatoare, din punct de vedere practic, in viitor.

In scenariul cel mai pesimist, al plafonarii microelectronicii la nivelul maxim permis de tehnica CMOS, va fi nevoie de numai cateva mii de ingineri proiectanti de dispozitive si tehnologie in toata lumea (fata de cateva zeci de mii in prezent, exclusiv China) pentru mentinerea si dezvoltarea incrementala a fabricatiei de circuite integrate. In schimb, sute de mii de ingineri vor concepe si proiecta scheme si sisteme electronice, comandand realizarea efectiva in fabrici a caror tehnologie standardizata ii va interesa mai putin sau chiar deloc. Lipsa de interes pentru tehnologia de fabricatie va putea fi similara cu cea a fotografilor care trimit filmele la laboratoarele Kodak sau Fuji pentru procesare, sau la atelierul de la coltul strazii echipat cu utilaje si retete ermetice ale acelorasi laboratoare. Similar, pe proiectantii de circuite electronice ii intereseaza mai putin sau deloc amanuntele tehnologiei circuitelor integrate cu multe straturi pe care le comanda pentru executie, prin Internet, la ateliere nevazute din lume.

In scenariul opus, al dezvoltarii in continuare al tehnicii electronice, specialitatea de dispozitive electronice se va diversifica si adanci conform directiilor in care se va gasi un continuator al siliciului. In timp ce viitorul electronicii de dispozitiv pentru auto-sustinerea materiala a celor care o vor practica ramane discutabil, provocarea pe care apropierea de limitele ale miniaturizarii o pune inteligentei umane, va fi din ce in ce mai tentanta. Ca o reflectare a sperantelor asociate cu dezvoltarea electronicii integrate in continuare, guvernul american a alocat pentru anul 2005 un fond de aproximativ 1 miliard de dolari pentru *initiativa de nanoelectronica*, dublu fata de alocarea pe anul 2001, cand a fost lansata aceasta initiativa [3]. Conform definitiei care insoteste actul de finantare, *nanoelectronica* cuprinde dispozitive electronice cu dimensiuni nanometrice si cu functionare calitativ diferita care rezulta tocmai din nivelul acestor dimensiuni, excluzand astfel tehnica tranzistoarelor miniaturizate la dimensiuni submicronice.

Desi pana in prezent nu s-a conturat un inlocuitor fezabil economic al tehnicii CMOS pe siliciu¹, universitatile americane si institutiile de cercetare finantate in cadrul initiativei de

¹ Situatia prezenta este diferita de tot ce s-a observat in trecut, cand de la publicarea unei idei noi de proces tehnologic de fabricatie pana la disponibilitatea comerciala a produselor respective nu erau mai mult de doi ani. Despre nanoelectronica se vorbeste de peste 10 ani fara nici un produs cu adevarat nanoelectronic pe piata.

nanoelectronica continua sa lucreze la intreaga capacitate si intr-o confruntare fara precedent cu complicatiile matematice, fizice si tehnologice pe care le implica apropierea de limitele fizice. Editia 2003 a lucrarii *International Technology Roadmap for Semiconductors*, publicata recent de comitetul international ITRS [4], dedica capitolul special de *dispozitive de cercetare noi (emerging research devices)* dispozitivelor neconventionale presupuse a inlocui tehnica CMOS, mentionand insa ca “*Provocarile pentru industria de procesarea informatiei in perioada post-CMOS sunt destul de diferite, deoarece nu este clar ce trebuie sa fie facut... nu se crede deaspre nici una din tehnologiile noi explorate in prezent ca va avea posibilitati reale de inlocuire a siliciului CMOS*”. Totusi, pentru prima data, in aceasta editie a lucrarii, familia memoriilor este tratata separat, pe baza unei parametrizari functionale, indiferent daca ele sunt contruite conventional, din tranzistoare sau sunt blocuri inseparabile care executa functia de memorie. De asemenea, pentru prima data s-a introdus categoria de dispozitive *inspirate biologic*. In terminologia folosita in trecut, acestea apartin categoriei *electronica functionala*. Desi terminologia initiala nu a prins (probabil din cauza folosirii curente a calificativului “functional” in testarea circuitelor integrate: circuit functional = circuit care functioneaza electric, dar nu necesar in limitele parametrilor de sortare), acest gen de electronica a ramas singura speranta privind perpetuarea interesului pentru dezvoltarea in continuare a tehnicii electronice. Terminologiile folosite in prezent pentru dispozitivele functionale sunt *dispozitive noutate (novel devices)* sau *dispozitive neclasice* si cuprind mai multe familii mari de dispozitive functionale clasificate dupa natura fizica a variabilei logice de stare (tensiune, sarcina sau polarizatie electrica, polarizatie magnetica, orientare de spin, etc.)

Am facut aceasta introducere si aducere la zi a subiectului pentru a remarca faptul ca Academicianul Mihai Draganescu a fost atras de ideea *electronicii functionale* inca din anii '70, cand tehnica semiconductoarelor era la inceputul ascensiunii ei pe linia trasata de *Legea lui Moore*, departe de gandurile in legatura cu atingerea limitelor fizice. Sub influenta domniei sale, subiectul *electronicii functionale* era discutat frecvent in cadrul catedrei de dispozitive electronice, iar din 1978 facea obiectul unui curs oficial in programa analitica a facultatii de electronica. Cartea *Microelectronica* a lui Edward Keonjian [5], tradusa in limba romana, era dezbatuta in aceste discutii probabil chiar mai mult decat in cercurile in care lucra autorul ei.

Ramanedeci de vazut daca principiul lui Grove “*Daca ceva se poate face, se va face*” se va putea aplica, in continuare.

Preocuparea si dedicarea Academicianului Mihai Draganescu pentru electronica functionala a mers asa de departe incat a scris cartea in doua volume *Electronica Functionala* in colaborare cu Gheorghe Stefan si Corneliu Burileanu [6]. Recitind capitole din carte, am redescoperit nu numai ceea ce este una dintre tratarile cele mai atotcuprinzatoare a limitelor microelectronicii (capitolul 3, *Limite structurale. Complexitate*), dar si unghiul de abordare superior, filozofic. In timp ce marea majoritate a analistilor industriali ai subiectului sunt obsedati de limitele profitabilitatii, Academicianul Draganescu sintetizeaza problema inteligentei artificiale in urmatoarele cuvinte: “... *Este evident ca cele mai mari sanse le va oferi electronica moleculara sau, in general, nanoelectronica. Dar fara viata, inteligenta artificiala va ramane intotdeauna la frontiera tehnologiei structural-fenomenologice si nu va avea functiuni de intuitie si creativitate. Aceasta nu inseamna ca pentru domenii limitate ale realitatii inteligenta artificiala nu poate depasi inteligenta naturala a omului. Si o depaseste prin sistemele expert contemporane care au o viteza de procesare inferentiala mult mai mare decat a omului si pot cuprinde simultan mai multe aspecte ale unei probleme decat poate cuprinde mintea umana*”. Reflexiile de mai sus explica, printre altele, accelerarea observata in ultimii ani (perioada microprocesoarelor Pentium I-IV) in scalarea electronicii CMOS mai rapid decat prezicerile Legii lui Moore.

Microprocesoarele cu milioane de tranzistoare proiectate si realizate cu ajutorul utilajelor de proiectare si productie echipate ele insile cu microprocesoare din generatiile anterioare s-au realizat, evident, mai rapid decat se astepta pe baza extrapolarilor bazate pe experienta din vremurile cand acestea se proiectau manual, la planseta, si se procesau in utilaje reglate manuale.

Analiza Academicianului Draganescu asupra limitelor microelectronicii cuprinde limitarile fundamentale, de dispozitiv, de circuit si sistem, tehnologice si de complexitate, ultima categorie avand o dezvoltare mai ampla. Este interesant de observat ca, in prezent, tocmai complexitatea se considera ca fiind determinanta pentru conturarea limitelor practice ale miniaturizarii electronice. Cu exceptia memoriilor, restul claselor de circuite integrate apar sa nu fie realizabile la densitati de integrare mai mari decat cele permise la nodul tehnologic de 90 nm deoarece sistemele uriase a caror integrare ar fi posibila tehnologic cu aceasta tehnologie sunt foarte greu, daca nu chiar imposibil de proiectat. Dupa Dr. T. J. Rogers, pionier al dezvoltarii tehnicii de integrare pe scara mare, “*Sfarsitul Legii lui Moore se va intampla nu atunci cand izolatoarele nu vor mai izola, ci atunci cand cipul urmator de siliciu va deveni un proiect stiintific, nu un produs*” [7]. La nivelul intregii lumi, numai putine firme vor avea infrastructura organizatorica si competenta tehnica

colectiva necesara ca sa conceapa si sa proiecteze sisteme integrate cu sute de milioane de tranzistoare si sa garanteze, inainte de realizarea in siliciu, ca blocurile sistemului, proiectate de echipe diferite de ingineri, vor functiona coerent.

Viitorul Specialitatii de Inginer de Dispozitive Electronice

Specialitatea de inginer de dispozitive electronice exista in prezent in profilul Politehicii din Bucuresti ca urmare a concepiei Profesorului Tudor Tanasescu, intemeietorul scolii romanesti de electronica, de a produce in tara componentele necesare realizarii produselor electronice [8]. Aceasta concepie a fost perfect justificata in contextul tehnologic si politico-economic a peste 5 decenii de la implementarea ei in anul 1953 (Facultatea de Electronica si Telecomunicatii) si a condus la rezultatele remarcabile pe care le-am mentionat in lucrarea [1]. Ea a fost caracteristica si potrivita nu numai Romaniei, dar si majoritatii tarilor civilizate. Dupa cum mentiona Andrew Grove la editia 2002 a IEDM, “... *In anii '70, o fabrica de semiconductoare costa in jur de 3 milioane de dolari si oricine era in aceasta industrie avea fabrica lui*” [8]. Romania nu facea nici o exceptie, avand, timp de peste 10 ani, trei fabrici de semiconductoare una langa alta, pe soseaua Erou Iancu Nicolae, In Bucuresti! “... *Pe vremea aceea, in structura unui tranzistor cu siliciu erau implicate 5 materiale determinante. In prezent, o fabrica de microelectronica se construiește cu peste 3 miliarde de dolari, iar in 2010 suma respectiva va avea doua cifre, in aceleasi unitati, cu peste 20 materiale esentiale in constructia tranzistorului*”. Din materialele esentiale, numai doua (borul si fosforul, impuritati atomice) fac parte din grupul initial. Chiar si siliciul cristalin natural, a fost schimbat recent cu siliciu epitaxial tensionat, pentru cresterea mobilitatii electronilor in el. Este evident, ca, oricat ar fi de determinata pe linia independentei economice, orice tara de dimensiunea economica a Romaniei trebuie sa iasa din cursa superminiaturizarii electronice. Chiar daca electronica functionala ramane o speranta pentru perpetuarea miniaturizarii, nimeni nu crede ca aceasta va cobori inaltimea barieirei de acees mentionata de Grove.

Pe de alta parte, dupa Dr. Howard Huff, inaintas al tehnicii semiconductoarelor, “*Este putin probabil ca infrastructura de siliciu mondiala prezenta va putea fi regenerata ca sa sustina un succes al siliciului. Corespunzator, tehnica siliciului este de asteptat ca sa continue ca cel mai puternic conductor al erei informatiei pentru cel putin urmatorii 100 ani, fie si in conjunctie cu structuri complementare de dispozitive*” [10]. Acest scenariu, coroborat cu apropierea de limitele

fizice de disipatie termica, curenti reziduali si de limitele de complexitate, implica saturarea treptata a nivelului de miniaturizare si patrunderea, in continuare, a electronicii si tehnicii de calcul in toate aspectele vietii materiale si sociale, la nivelul miniaturizarii de *comoditate* oferita de cei cativa furnizori de electronica integrate din lume, in principal concentrati in Taiwan si China.

In scenariul descris de Howard Huff, pregatirea inginerilor electronisti ar trebui intensificata in directia aplicatiilor si sistemelor electronice. De altfel, in prezent, in sub-specialitatea de aplicatii, in special cea de aplicatii liniare, exista chiar un deficit de proiectanti cu experienta. Inginerii produsi de facultatea de electronica a Politehnicii din Bucuresti se bucura de mare succes atat in tara cat si in strainatate. In ceea ce priveste specialitatea de ingineri de dispozitive, aceasta va continua sa fie ceruta in masura in care inginerii respectivi se vor putea integra in fabricatia globala de circuite integrate. Tehnica semiconductoarelor are si va avea intotdeauna un profund caracter experimental. Fara integrarea cu fabricatia, functionarea ca inginer de dispozitive ramane nevalidata de confruntarea cu realitatea experimentală. In prezent si, probabil si in viitor, exista si vor exista oportunitati reale de integrare globala in sub-domeniul fabricatei de circuite liniare si de semnale mixte. Aceasta fabricatie, desi redusa ca volum prin restructurari repetate, nu se preconizeaza sa fie transferata in mega-fabrici din Asia. Specialitatea de inginer de dispozitive se va adanci in directia modelarii dispozitivelor pentru simularea de circuit (*Compact Modeling*), devenind astfel o specialitate de suport pentru proiectarea de circuite si sisteme. De asemenea, *simularea de procese si dispozitive (Technology Computer-Aided Design, TCAD)*, va ramane viabila in masura in care se va putea integra in proiectarea si productia globala de microelectronica. De altfel, Profesorul Adrian Rusu, membru corespondent al Academiei Romane, seful catedrei de dispozitive si circuite electronice este deja orientat pe prima directie, iar Profesorul Marcel Profirescu, din aceeasi catedra, este un veteran al celei de a doua, ambii promotori mentionati fiind bine integrati in sistemul international al competentelor respective.

In cele doua directii mentionate, catedra de specialitate a Politehnicii din Bucuresti beneficiaza de o metodologie de proiectare bazata pe analiza fenomenelor fizice, fundamentata si cultivata cu rigurozitate, de la inceput, de Profesorii Tudor Tanasescu si Mihai Draganescu. Modelarea de circuit, dispozitiv, sau proces conceputa in spiritul acestei culturi are calitatea esentiala de a fi *predictiva*, conform cerintei esentiale pentru orice calcul ingineresc, sau, in

limbaj modern, *simulare cu ajutorul calculatorului*. Desi aparent o cerinta elementara de bun-simt tehnic, aceasta nu este satisfacuta in toate scolile de modelare/simulare. In prezent exista scoli in care accentul principal se pune pe calitatea modelarii/simularii de a fi *precisa* in primul rand. In extrem, neglijandu-se sau chiar eliminandu-se continutul fizic, se ajunge la o tehnica de *imitare* a realitatii experimentale, care este numita, in reclama, "*simulare predictiva*", dar care este, in realitate, numai o *simulare postfactum*, pe baza de potrivire matematica de curbe, fara nici o valoare predictiva.

In ceea ce priveste *electronica functionala*, este greu de prezis ce evolutie va lua tehnica electronica dupa consumarea fondurilor alocate generos in prezent in cadrul initiativei de nanoelectronica. Este posibil sa rezulte mult-speratul continuator al siliciului, dupa cum este posibil sa se constate o deziluzie din punctul de vedere al viabilitatii economice. Cred ca, in materia respectiva, omenirea este acum la un moment de mare rascruce in care numai putini vizionari sunt capabili sa faca analize, preziceri si propuneri practice. Din fericire pentru Romania, unul din ei este Academicianul Mihai Draganescu.

In ceea ce ma priveste, reprezentand de mai multi ani firma *National Semiconductor* la prezentarile de avizare a rezultatelor cercetarilor de nanoelectronica din cadrul catorva consorții industrial-guvernamentale sau industrial-universitare (*Semiconductor Research Corporation, SEMATECH, Stanford Center for Integrated Research*), observ in mod repetat rezultatele teoretice cu totul remarcabile ale universitatilor si laboratoarelor de cercetare angajate in programul de nanoelectronica dar si dificultatile fizice si, mai ales economice, la punerea in aplicatie a cercetarilor respective. In situatia general cetoasa pe acest platou tehnologic batut de vanturi, conclud ca sunt in fata unei situatii fara precedent in istoria tehnicii electronice si ma abtin sa fac preziceri si propuneri concrete. Indraznesc insa sa speculez ca industria electronica nu ar fi ajuns in situatia actuala de criza privind prefigurarea viitorului ei daca cercetarea de electronica functionala ar fi fost intretinuta, fie chiar si la un volum rezidual redus, din anii '60, cand conceptul respectiv a fost disponibil in domeniul public. Cu cei peste 30 ani de "orbire" produsa de succesul tehnicii CMOS, nu este exclus ca ajungerea la un nou punct de echilibru si crestere sa se intample cu o intarziere pe masura timpului respectiv, corectata de un factor de accelerare datorat tehnicii de calcul.

* * *

Activitatea si opera Academicianului Mihai Draganescu au fost si sunt de importante inexprimabile pentru dezvoltarea tehnicii electronice din Romania si, in general pentru cunoasterea umana. Momentul aniversarii a 75 de viata coincide, in mare, cu un moment de rascruce in orientarea specialitatii de inginer de dispozitive atat in Romania, cat si in general. Este de asteptat ca analizele si prezicerile domniei sale – pana acum perfect confirmate de viata – vor continua sa fie in centrul atentiei celor care le-au urmarit si s-au inspirat din ele de-a-lungul anilor. Este deci cu atat mai potrivit ca, impreuna cu multumirile noastre pentru tot ce a facut pentru scoala de semiconductoare pe care a creat-o si pentru stiinta, in general, sa ii uram sanatate, viata lunga, si, mai ales, mentinerea exceptionalei creativitati si a entuziasmului pentru cunoastere care il caracterizeaza.

Bibliografie

1. Constantin Bulucea, “Activitatea si Opera Acad. Mihai Draganescu in Contextul Dezvoltarii Stiintei si Tehnicii Electronicii si al Globalizarii”, Simpozionul Academiei Romane *Știința, Tehnologia și Filosofia Informației în Opera și Viața Acad. Mihai Drăgănescu*, Bucuresti, 8 Aprilie 2004.
2. Gordon Moore, “No Exponential is Forever”, Keynote Address, *International Conference for Solid-State Circuits*, San Francisco, Februarie 2003.
3. *The Nanoelectronics Initiative Supporting the Next Industrial Revolution*, <http://www.nano.gov/>, 2004.
4. *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)*, 2003 Edition, <http://public.itrs.net/Files/2003ITRS/Home2003.htm>, 2003.
5. Edward Keonjian, *Microelectronics*, McGraw-Hill, New York, 1963.
6. Mihai Draganescu, Gheorghe Stefan si Corneliu Burileanu, *Electronica Functionala*, vol. 1, 2, Editura Tehnica, Bucuresti, 1991.
7. Ed Sperling, “Is Moore’s Law Irrelevant ? ”, *Electronic News*, 14 August 2003.
8. Andrew Grove, “Changing Vectors of Moore’s Law”, Keynote Address, *International Electron Devices Meeting*, San Francisco, Decembrie 2002.

9. Mihai Draganescu, Adrian Rusu, Stefan Iancu, editori, *Tudor Tanasescu, Fondatorul Scolii Românești de Electronica*, Editura Dorotea, Bucuresti, 2001.
10. Howard Huff, “From the Lab to the Fab – Transistors to Integrated Circuits”, *International Conference on Characterization and Metrology for ULSI Technology*, March 24-28, 2003.