

„IQubits”: un pas important în reluarea cercetării componentelor semiconductoare avansate pe Siliciu în IMT

Proiectul „IQubits” (Integrated Qubits Towards Future High-Temperature Silicon Quantum Computing Hardware Technologies” - 2019-2023) este unul dintre proiectele de avangardă derulate în ultimii ani în cadrul Institutului Național de Cercetare Dezvoltare pentru Microtehnologie – IMT-București, mai precis în *Laboratorul de Microsisteme și componente microprelucrate de microunde și unde milimetrice*. Proiectul, prin rezultatele obținute, publicate, în curs de publicare, va aduce contribuții noi și originale în domeniul extrem de nou al *quantum computing*-ului, de la care se așteaptă să aibă un uriaș impact în știința calculatoarelor, în tehnologia secolului 21 și implicit în economie și societate.

 **Alexandra Nicoloiu, Claudia Năstase, Alexandru Müller**

PE DRUMUL DEZVOLTĂRII QUANTUM COMPUTING-ULUI ȘI A INDUSTRIEI ELECTRONICE EUROPENE

„IMT-București are o lungă istorie în participarea la proiectele din cadrul programelor cadru ale UE, fiind de departe prima instituție de cercetare din România în privința ratei de succes, dacă luăm în considerare numărul de proiecte europene câștigate raportat la numărul de cercetători (sau angajați) ai instituției. Primele participări românești la proiecte europene au fost în cadrul programului cadru FP4. În anul 1997, IMT - prin Laboratorul de Microsisteme și componente microprelucrate pentru microunde și unde milimetrice - a câștigat, în calitate de coordonator, proiectul FP4 MEMSWAVE (1998-2001). A fost primul proiect în domeniul IST coordonat de o țară ex-comunistă. Proiectul a avut un succes deosebit și a fost nominalizat între cele 10 proiecte finaliste pentru premiul Descartes al EU 2002. IMT a câștigat un număr impresionant de proiecte în cadrul programelor ulterioare: FP6 (15), FP7 (12), și H2020 (12).

Prin notorietatea câștigată, precum și prin noutatea tematicilor abordate, Laboratorul de Microsisteme și componente microprelucrate pentru microunde și unde milimetrice din cadrul IMT-București a avut o contribuție importantă în participarea institutului la proiectele finanțate de Comisia Europeană și recent a reușit să contribuie la câștigarea primelor proiecte de tip FET OPEN cu participare românească. Aceste proiecte sunt legate de cercetări avansate, cercetări fundamentale cu tematici emergente, la care se întrevăd aplicații concrete peste mai mult de zece ani. Două dintre aceste abordări o tematică extrem de fascinantă – „dispozitive și circuite pentru Quantum Computing”. Este vorba de proiectele FET OPEN în derulare, Chiron și IQubits. Proiectul IQubits își propune dezvoltarea tehnologiilor pentru realizarea qubitilor în conexiune cu tehnologiile CMOS avansate. Realizarea cipurilor de tranzistoare cu un singur electron sau un singur „gol” presupune revenirea IMT București, după 30 de ani, la tehnologiile de bază (de astă dată adaptate secolului 21) specifice fabricației componentelor electronice avansate. Readucerea fabricației acestora în Europa și America de Nord reprezintă un obiectiv esențial al programelor europene și americane de dezvoltare a industriei electronice în viitor.”

Dr. Adrian Dinescu,
Director General IMT-București



Dezvoltarea tehnologiilor de tip *quantum computing* folosind cele mai avansate tehnologii de tip CMOS utilizate la ora actuală de marii producători mondiali de componente electronice semiconductoare destinate telefoanelor celulare, calculatoarelor și centrelor de date, reprezintă, în opinia IMT-București, abordarea cea mai rațională în vederea obținerii, într-un viitor previzibil, a unor rezultate promițătoare pe drumul dezvoltării calculatoarelor cuantice performante, iar proiectul „IQubits” își propune să împlinescă acest deziderat.

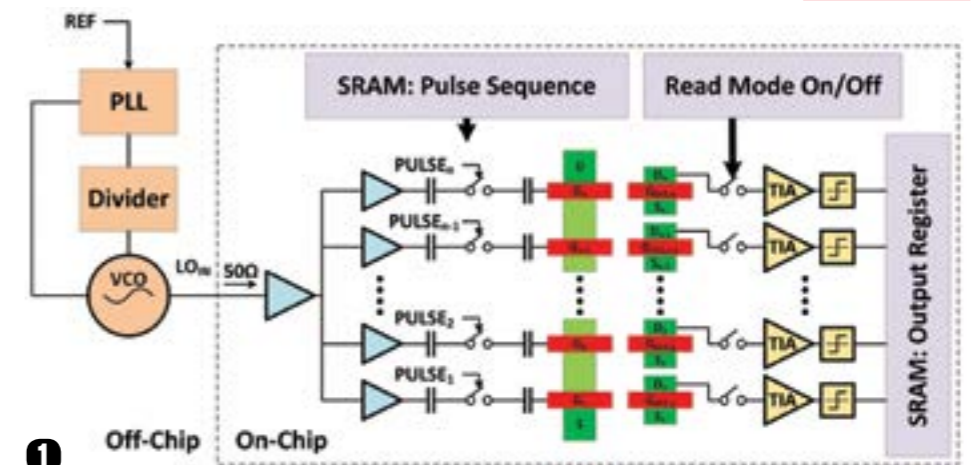
„IQubits” a fost câștigat în cadrul competiției FET OPEN din programul european H2020. Call-ul FET OPEN finanțează cercetările

pentru tehnologii emergente și fundamentale, cărora li se întrevăd aplicații industriale peste mai mult de 10 ani. Proiectul are coordonator Universitatea Aarhus din Danemarca și următorii membri în consorțiu: IMT-București, FORTH Heraklion, University of Toronto (fără finanțare), CNR Modena și Applied Materials (Italia). Este unul din puținele proiecte europene cu participare nord americană.

Echipa din IMT este condusă de dr. Alexandru Müller, doctor în fizică din 1990, Universitatea București. Echipa proiectului are expertiză multidisciplinară în fizica și ingineria microsystemelor și este compusă din 6 cercetători seniori, un postdoc, un doctorand și un tehnician. Domeniile de expertiză ale echipei cuprind micro și nano prelucrare Si, GaAs și GaN, dispozitive acustice (SAW și FBAR) bazate pe microprelucrare și nanoprocesarea semiconductoarelor de bandă largă (AlN, GaN, ScAlN), realizarea de dispozitive și circuite în tehnologii RF MEMS.

Ideea acestui proiect a fost generată de echipa Universității Toronto, condusă de profesorul Sorin Voinigescu, absolvent al Politehnicii din București și tânăr cercetător la ICCE București (actualul IMT București) între 1986 - 1988. IMT a avut un rol activ în conceperea acestui proiect, având o activitate anterioară lansării lui pe tematica propusă: rezultate foarte bune obținute în domeniul nanolitografiei avansate (colectivul condus de dr. Adrian Dinescu), precum și cele obținute în domeniul caracterizării componentelor semiconductoare în curent continuu și în domeniul microundelor la temperaturi criogenice (5K) în prezența câmpului magnetic (colectivul condus de dr. Alexandru Müller) de la IMT-București. În faza de propunere a proiectului (în perioada 2017 – 2018) s-au pus în evidență efecte cuantice la temperaturi joase pe tranzistoare p-MOS proiectate la Universitatea din Toronto și realizate în tehnologie comercială CMOS de 22 nm la Global Foundry. Măsurătorile au fost realizate pe un set-up adaptat *in house* la IMT.

Obiectivul principal al proiectului vizează demonstrarea experimentală a capabilității qubitilor (unitatea elementară a unui calculator cuantic) și a circuitelor integrate monolitice de tip qubit („qubit ICs”) pentru calculatoare cuantice să opereze la temperaturi mai mari de 3 K. Acesta reprezintă un pas important pentru dezvoltarea într-un viitor previzibil a unor calculatoare cuantice cu peste 1 milion de qubiti integrați pe același cip semiconductor cu circuite electronice clasice pentru controlul și citirea operațiilor



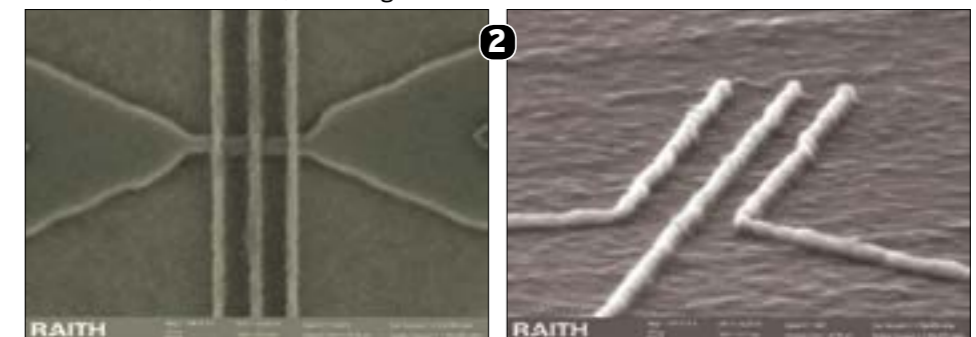
1 Diagramă bloc a unui calculator cuantic bazat pe spinul golurilor, capabil să opereze la 4 K și propus în proiectul IQubits de University of Toronto. Se poate observa registrul unidimensional de qubiti în verde deschis, constând din porțile G1... Gn (în roșu) integrate monolitice pe același cip cu circuite electronice de control (în stânga qubitilor) și cu electronică pentru citirea rezultatului cuantic: al doilea registru în verde închis, și circuitele din dreapta lui. [S. Bonen et al. SSE în curs de publicare]

cuantice. Deși par foarte reduse, aceste valori de temperatură sunt de 100 de ori mai mari decât cele (de ordinul zecilor de mK) la care operează la ora actuală computerele cuantice experimentale cu cca. 50 qubits ale unor firme precum Google sau IBM, și ai căror qubiti utilizează joncțiuni Josephson supraconductorare.

Problema principală a calculatoarelor cuantice de astăzi este că se află la nivelul rudimentar la care se găseau calculatoarele clasice cu tuburi electronice în anii 1940. Încă nu s-a descoperit tranzistorul, adică un qubit performant! În primul rând, aceste calculatoare sunt masive, ocupând două camere pentru doar 50 de qubiti. Fiecare qubit este conectat la instrumente de control și citire prin câteva cabluri coaxiale cu peste un metru lungime. Sunt greu de scalat la un număr mare de qubiti (un calculator cu un milion de qubiti, dacă ar fi posibil, ar avea dimensiunile unui stadion de fotbal), au o rată de eroare foarte mare (cca 10^{-2}) și nu pot executa decât algoritmi foarte scurți, cu 5-10 pași. Nu este de mirare că, deocamdată, nici un algoritm

cuantic cu adevărat util nu a fost încă rulat pe un calculator cuantic. Pe lângă obstacolele deosebite de realizare practică a hard-ului, mai există și o problemă de pregătire interdisciplinară a cercetătorilor, programatorilor și inginerilor care lucrează sau vor lucra în acest domeniu. Calculatoarele cuantice nu sunt digitale. Semnalele, dacă vreți programele, care controlează qubitii sunt similare în formă, frecvență (5-7 GHz) și complexitate cu cele folosite în telefoanele 5G. Fără a exagera, se poate spune că este nevoie de un transceiver 5G pentru controlul fiecărui grup de 5-10 qubiti. Imaginați-vă un calculator cu 1 milion de qubiti care are nevoie de 100.000 de telefoane celulare, fiecare consumând 1 W, și care să funcționeze la 20 mK. Nu doar qubitii sunt o problemă formidabilă de rezolvat, dar și electronica de control pune probleme deosebite de design și, mai ales, consum de putere.

În proiectul IQubits, **figura 1**, qubitii, bazați pe spinul golurilor sau electronilor, sunt realizați într-o structură de tip „punct cuantic” (quantum dot) formată în canalul unui tranzistor MOSFET cu dimensiuni mai mici de 50 nm.



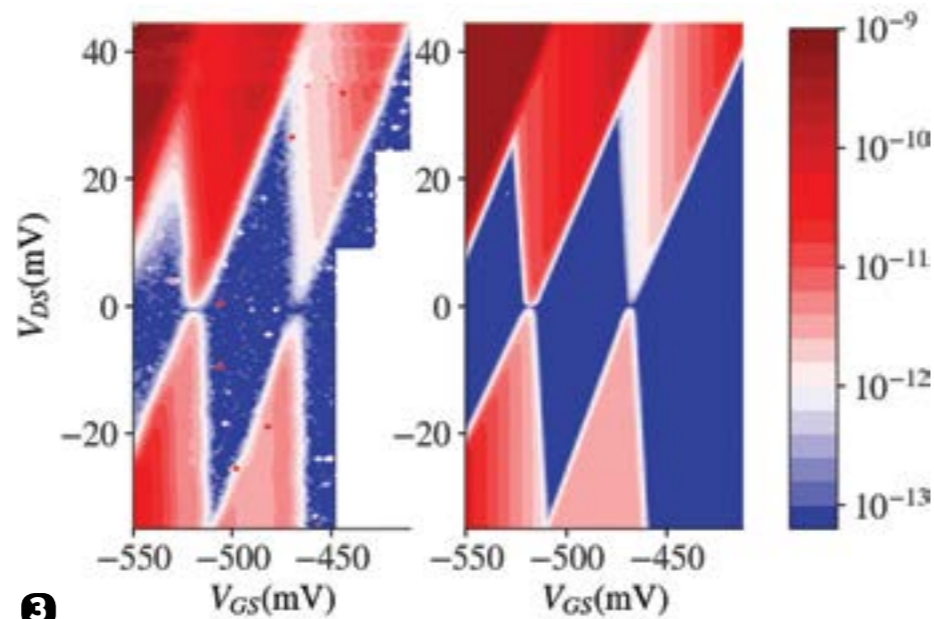
2 Imagini SEM ale unor nanostructuri obținute prin nanolitografie în IMT-București (Dr. Adrian Dinescu)

Qubitul este chiar banalul tranzistor! Principalul avantaj al acestei platforme tehnologice este că deja există procese de fabricație de volum mare care permit integrarea câtorva miliarde de tranzistoare, adică spin qubiti, într-o arie de siliciu de 2.5cmx2.5cm. Cuplajul cuantic (entanglement) între qubitii învecinați ce formează un registru unidimensional sau bidimensional se va realiza prin tunelare controlată a două „puncte cuantice” (quantum dots) alăturate. Citirea stării qubitilor la sfârșitul unui algoritm cuantic se realizează prin cuplarea capacitivă a fiecărui qubit cu un tranzistor cu un singur electron (single-electron transistor = SET) sau cu un singur gol (single hole transistor = SHT); structurile test de tranzistoare single electron/ single hole și structurile de qubits realizate prin cuplarea acestor tranzistoare sunt fabricate în tehnologia de 22nm FDSOI de la GlobalFoundries în baza unei colaborări și a unui proiect de calculator cuantic monolitic propus de Universitatea Toronto, membră în consorțiul proiectului H2020 FETOpen IQubits. CNR și Applied Materials Italia se ocupa de modelarea cuantică a structurilor de qubits, iar Universitatea Aarhus din Danemarca participa în proiectarea și testarea circuitelor electronice pentru manipularea spinului qubitilor și pentru citirea rezultatului la terminarea algoritmului cuantic. În paralel, FORTH Grecia studiază metode de fabricare pentru o tehnologie alternativă de realizare a qubitilor utilizând semiconductori compuși pe bază de nitruri și elemente din coloana a treia a tabelului periodic (III-nitrides).

Caracterizarea acestor tranzistoare și a qubitilor la temperaturi joase ($T = 2 - 10$ K) și în câmp magnetic este obiectivul unui pachet de lucru al cărui lider este grupul din IMT. IMT are, de asemenea, o importantă implicare în dezvoltarea experimentală a tranzistorilor de tip qubit cu lungimea porții de cca. 10 nm, valoare sub limita atinsă de vreo tehnologie industrială în acest moment. Realizarea și caracterizarea acestor structuri test va fi extrem de utilă pentru momentul în care tehnologiile industriale (care utilizează tehnici de tip „extreme UV”, tehnicile de e-beam lithography, utilizate în cercetare, nefiind aplicabile industrial din cauza faptului că procesează fiecare structură individual, ceea ce le face extrem de lente) vor ajunge la aceste dimensiuni (e vorba de 3-5 ani cel mai probabil). **Figura 2** prezintă o imagine SEM centrată pe zona canalului de Si cu trei porți. Dimensiunea critică a porții este 25nm, iar a liniei în fotorezist (HSQ) de 15nm.

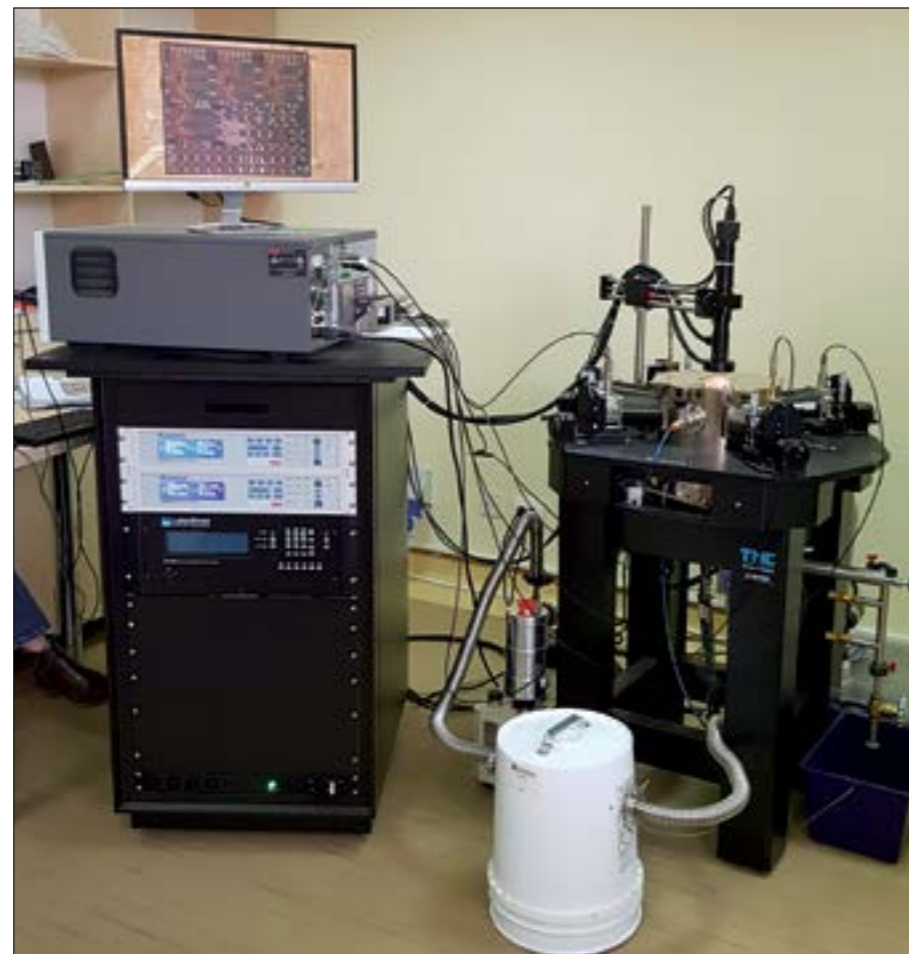
Activitatea de caracterizare a dispozitivelor se realizează în cadrul IMT pe trei tipuri de instalații:

- Sistem de test on-wafer (realizat în IMT-București prin adaptarea unui echipament criogenic destinat dispozitivelor încapsulate). El se bazează pe un criostat de tip Janis (SHI-4H-1), adaptat pen-

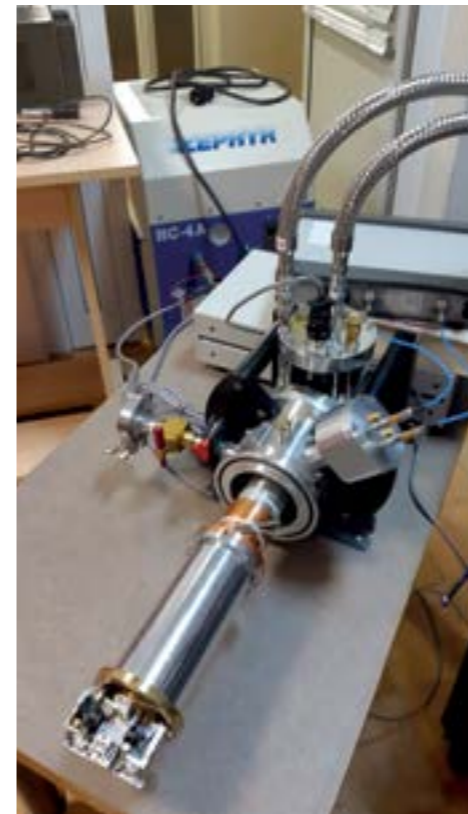


3

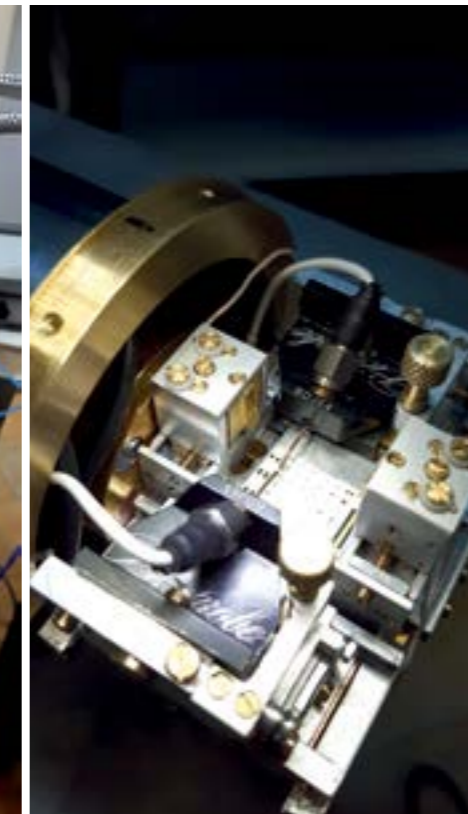
Diagrama de stabilitate cu diamantele Coulomb pentru un tranzistor pMOS: măsurători la 6.2 K realizate în IMT-București (stânga) și simulări realizate de echipa de la Universitatea Toronto (dreapta); Rezultate prezentate la IEEE 51st European Solid-State Device Research Conference - Compact Modelling of 22nm FDSOI CMOS Semiconductor Quantum Dot Cryogenic IV Characteristics, S Pati Tripathi, S Bonen, C Năstase, S Iordănescu, G Boldeiu, M Pășteanu, A Müller, SP Voinigescu, ESSCIRC 2021-IEEE 47th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC), 43-46



Echipament Lake Shore Cryotronics, Model CPX-VF cu He lichid, dedicat caracterizării I-V în câmp magnetic, la temperaturi joase (~2 K); Conectarea rezorului criogenic de Heliu la echipament



Sistem de măsură on-wafer cu criostat Janis pentru măsurarea parametrilor S până la 110 GHz și temperaturi până la 5 K (stânga); sistem de măsură on-wafer cu kit de calibrare (dreapta)



tru măsurători criogenice „on die” pe structuri de tranzistoare în DC și în microunde (până la 67 GHz), prin realizarea unui cap de măsură special care încapă în corpul criostatului și este conectat cu cabluri speciale la echipa-

mente de măsură în dc și microunde. Acesta era singurul echipament existent în consorțiul internațional la începutul proiectului IQubits, capabil să realizeze măsurători DC și RF (până la 67 GHz) la temperaturi criogenice

Articol publicat cu suportul proiectului EU Horizon 2020 FET OPEN „IQubits” (GA No 829005).



Colectivul IMT implicat în proiectul H2020 FETOPEN IQubits. De la stânga la dreapta: Dan Vasilache, Alexandru Müller, Adrian Dinescu, Sergiu Iordănescu, Ioana Zdru, George Boldeiu, Alexandra Nicoloiu, Claudia Năstase, Mircea Pășteanu