

EXTRAGEREA PARAMETRILOR PENTRU PROGRAMUL DE SIMULARE SCHEMOTEHNICĂ SPICE LEVEL3

¹V. Rusanovschi, dr.hab., ²M. Rusanovschi, dr.conf.univ., ²P. Stoicev, dr.hab., prof. univ.

¹Agenția de Stat pentru Proprietatea Intelectuală a Republicii Moldova

²Universitatea Tehnică a Moldovei

INTRODUCERE

Utilizarea circuitelor integrate (CI) în tehnica de calcul și în aparatul aflat sub influența iradierii ionizante (II) necesită cercetarea aprofundată a fiabilității elementelor active, variației parametrilor elementelor și a CI în ansamblu. Timpul de lucru a acestora este determinat în primul rând de funcționalitatea componentelor active.

Analiza deplina și prognozarea răspunsului CI poate fi efectuată cu ajutorul programului de simulare schemotehnică SPICE, luând în considerație modelul de degradare a elementelor acestuia. Rezultatele simulării depind de exactitatea valorilor parametrilor relevanți, de metodele de determinare a acestora din caracteristicile elementelor de până și după iradiere, necesită o sinteză și o interpretare corectă. Simularea schemotehnică, utilizând programul SPICE, necesită o informație detaliată, referitoare la parametrii elementelor și modele fiabile cu set de parametri, adecvați problemelor de simulare a fiabilității și stabilității la iradiere a CI.

1. DESCRIEREA PROBLEMEI

Cercetările experimentale a stabilității funcționării la iradiere a CI, de regulă, are loc la măsurarea nivelului de stabilitate a elementelor active (tranzistoare) a CI, deoarece pentru a înțelege natura degradării la iradierea directă pentru un circuit sau subcircuit este foarte dificil. De aceea, mai întâi, experimental se măsoară parametrii (caracteristicile) pentru un tranzistor, care sunt interpretate în cadrul unui model, apoi pe baza acestor rezultate se încearcă de a prognoza funcționalitatea CI în întregime. Cercetarea experimentală a răspunsului la iradiere a unui sistem atât de complicat cum este CI, de regulă are un caracter superficial (nedeplin). Informația insuficientă, referitoare la determinarea parametrilor relevanți la iradiere, poate contribui la o concluzie incorectă.

Teoretic, analiza deplina și prognozarea răspunsului CI poate fi efectuată cu ajutorul programului de simulare schemotehnică SPICE, luând în considerație modelul de degradare a elementelor acestuia. Desigur, această cale are și unele neajunsuri, deoarece rezultatele simulării depind de exactitatea valorilor parametrilor relevanți, de metodele de determinare a acestora din caracteristicile elementelor de până și după iradiere, necesită o sinteză și o interpretare corectă. Simularea schemotehnică, utilizând programul SPICE, necesită o informație detaliată, referitoare la parametrii elementelor și modele fiabile cu set de parametri, adecvați problemelor de simulare a fiabilității și stabilității la iradiere a CI.

O altă cale este analiza calitativă a funcționării CI, determinarea nodurilor (elementelor) critice și a parametrilor informativi, cu ajutorul cărora, degradarea CI poate fi legată de degradarea unor elemente sau componente a acestui circuit. Alegerea a astfel de parametri este posibilă, dacă parametrii CI în întregime pot fi determinați de parametrii unuia sau a câtorva tranzistoare.

Fiecare cale aleasă are unele restricții, deoarece stabilitatea la iradiere a CI nu corespunde întocmai cu stabilitatea la iradiere a componentelor ei. Stabilitatea la iradiere depinde de topologia și arhitectura CI, care nivelează sau amplifică efectele de degradare a unui element sau mai des a CI în întregime. Ca exemplu tipic pot fi elementele logice (EL) CMOS SI-NU și SAU-NU. La nivelul EL degradarea unor tranzistoare la iradiere este mai joasă din cauza efectelor circuitului (în elementul SI-NU), sau se amplifică din cauza arhitecturii celulei (în elementul SAU-NU). De menționat, că stabilitatea la iradiere a CI este determinată de stabilitatea la iradiere a celor mai joase stabilități a componentelor și blocurilor a acestora.

În afară de acesta, de regulă stabilitatea la iradiere se micșorează cu majorarea caracteristicilor funcționale a aparatului. De aceea, există un mare risc potențial de exploatare îndelungată în spațiul cosmic a aparatelor de mare precizie, cu caracteristici funcționale foarte complicate etc. Altă sursă de risc este utilizarea în spațiul cosmic a circuitelor hibride, deoarece pe un singur chip sunt

produse elemente cu diverse nivele de stabilitate la iradiere. Ca rezultat stabilitatea la iradiere a circuitului în întregime va fi mai joasă decât stabilitatea majoritatea componentelor.

Metodele moderne de proiectare automatizată includ programe și biblioteci foarte complicate a elementelor. Astfel de biblioteci conțin modele schemotehnice ale rezistoarelor, condensatoarelor, tranzistoarelor etc. Este necesar ca în procesul de proiectare a CI aceste modele să fie precise și adecvate elementelor corespunzătoare. În caz dacă CI este proiectat inițial, este necesar de a lua în considerație procedura de extragere a parametrilor elementelor. În alte cazuri, pentru tehnologii concrete, există deja toate modelele și bibliotecile elementelor din care pot fi extrași parametri până și după iradiere.

În prezent, la baza CI se află tehnologia CMOS. Degradarea structurilor MOS la iradiere este determinată de degradarea caracteristicilor elementelor, cauzată de modificarea parametrilor oxidului, interfeței oxid-semiconductor și oxid-metal în timpul iradierii [1–3]. Rezultă, că modelul tranzistorului MOS este modelul cheie în majoritatea proiectelor. La moment există foarte multe modele a tranzistoarelor MOS, fiecare dintre care mai mult sau mai puțin descrie precis toate efectele fizice. Liderul incontestabil în elaborarea modelelor TMOS este Grupul de Cercetare a Dispozitivelor de la catedra de Electrotehnică și Tehnică de Calcul din cadrul Universității din California, Berkly. Una di aceste elaborări este modelul BSIM3, care este orientat la tehnologii cu dimensiuni minimale de 0,25mkm. Acest model este realizat în SPICE3f5 și alte versiuni, în programul HSpice a firmei Avanti și în cadrul altor firme în programele specializate de proiectare automatizată. În unele cazuri, seturile de parametri pentru modelul BSIM3 puțin diferă una de alta în funcție de realizarea tehnologică, cu toate acestea, aceste diferențe sunt strict documentate și pentru utilizatorul final nu este dificil de a converti un anumit set de parametri pentru utilizarea într-un alt sistem de modelare.

2. EXTRAGEREA PARAMETRILOR SPICE LEVEL3

Setul minim de parametri ai TMOS cu canal lung pentru modelul SPICE LEVEL3 este următorul: KP (coeficientul transconductanței), VTO (tensiunea de prag), GAMMA (factorul de substrat), THETA (parametrul efectiv de modulare

a mobilității purtătorilor de către câmpul electric din canal) și ETA (parametru efectiv de canal scurt) [4]. Oportunitatea utilizării modelului LEVEL3 constă în faptul că acesta este bine asimilat, procesul de extragere a parametrilor durează un interval de timp minim, iar rezultatele obținute la simulare sunt fiabile. Rezultate obținute pot fi utilizate pentru optimizarea modelelor mult mai complicate, întrucât cele de nivele mai înalte includ, direct sau indirect, parametrii modelelor mai simple.

Mai întâi este necesar de a obține totalitatea caracteristicilor experimentale de intrare și de ieșire, determinată pentru TMOS cu canal lung și cu canal lat la diverse tensiuni de deplasare a substratului. Funcția-scop constă din suma pătratelor diferenței dintre valorile teoretice și cele experimentale. Determinarea ambalajului optimal de caracteristici se efectuează prin aplicarea metodei gradientului de căutare a minimului local al funcției multivariabile sau prin metoda Leveberga-Markvardta [5]. Astfel se extrag parametrii TMOS cu canal lung KP, VTO, GAMMA, THETA și ETA.

Pentru extragerea parametrilor TMOS cu canal scurt se calculează valoarea tuturor caracteristicilor de ieșire a TMOS cu canal scurt și cu canal lat pentru diverse tensiuni de deplasare a substratului.

Pentru extragerea parametrilor TMOS cu canal îngust se măsoară caracteristicile drenă-poartă ale TMOS cu canal lung și îngust. Optimizarea se efectuează fără a lua în considerație efectele canalului scurt.

În final, prin extragerea parametrilor mobilității și ai modulării lungimii canalului se măsoară caracteristicile TMOS cu canal lat și cu canal scurt pentru diverse tensiuni de deplasare a substratului.

Metodele de cercetare, de calcul și de optimizare a parametrilor la iradiere sunt descrise în [4]. Modificările propuse în modelul SPICE LEVEL3 permit de a minimaliza diferențele dintre valorile experimentale și cele modelate ale curentului în toate punctele caracteristicilor și de a determina parametrii relevanți la acțiunea RI din caracteristicile experimentale, obținute înainte și după iradiere.

Pe baza relațiilor propuse, a fost elaborat un program pentru extragerea parametrilor modelului SPICE, care permit simularea caracteristicilor TMOS.

În concluzie, menționăm că modelul SPICE LEVEL3 necesită un timp minim de calcul, se utilizează la calcularea TMOS cu canal scurt și ia în considerație efectele structurii integrate.

Metoda propusă de extragere a parametrilor elementelor CI exclude dezavantajele și dificultățile

utilizării modelului LEVEL3 la simularea caracteristicilor elementelor CI înainte și după acțiunea RI.

Pentru determinarea dependenței parametrilor de doza de iradiere este necesar de a determina valorile acestor parametri până la iradiere, apoi se determină parametrii relevanți la iradiere pentru diferite doze.

Procedura de extragere a parametrilor relevanți la iradiere conține mai mulți pași, la fiecare din acestea se extrag un anumit set de parametri. Pentru extragerea tuturor parametrilor este necesar de a avea setul de caracteristici de intrare și de ieșire a tranzistorului cu diverse lungimi și lățimi ale canalului.

Consecutivitatea acestor pași este prezentată în fig.1. La baza acestei metode stă programul de simulare SPICE. Din această schemă pot fi trasate următoarele etape de bază:

- În laboratorul experimental se măsoară caracteristicile Volt-Amperice ale elementelor de testare în dependență de doza de iradiere.

- Din aceste caracteristici sunt identificați parametrii modelelor SPICE în funcție de doza de iradiere.

- Se efectuează calcularea regimului static de lucru al TMOS.

- Pe baza modelului TMOS la iradiere se calculează noi parametri ai modelelor SPICE în dependență de regimul de lucru.

- Se efectuează simularea CI în care se includ elemente (rezistori, TMOS) ce modelează degradarea elementelor CI la iradiere.

- Se efectuează simularea și analiza definitivă a funcționării CI.

Cea mai importantă problemă pentru toate metodele elaborate până în prezent este determinarea parametrilor modelelor elementelor CI care iau în considerație efectele induse la iradiere

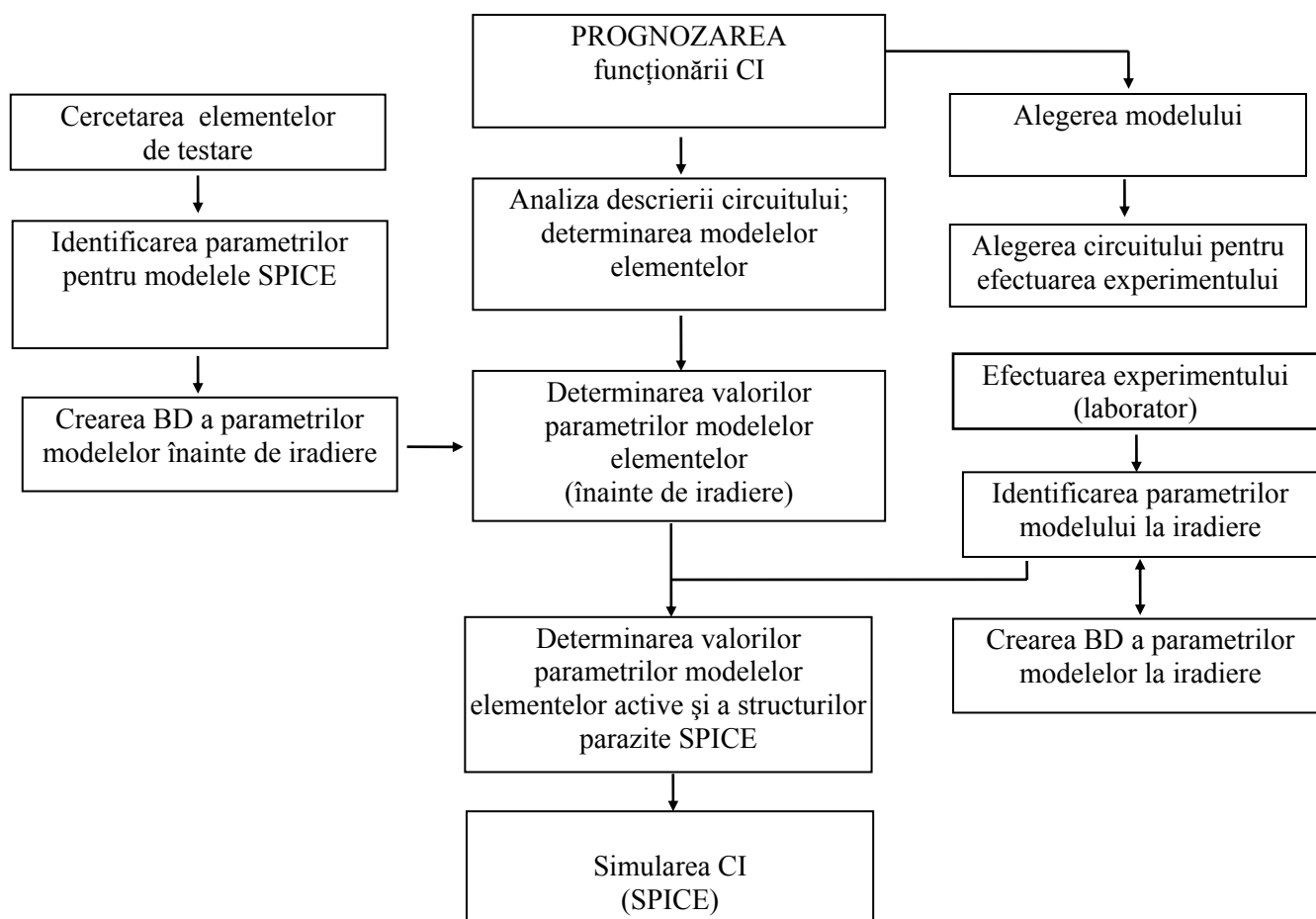


Figura 1. Schema metodei calcul-experiment.

3. MODELELE SPICE LEVEL 3 ȘI BSIM 3

După cum s-a menționat în [6], pentru metodele de prognozare a funcționării elaborate până în prezent cea mai importantă problemă constă în determinarea parametrilor modelelor elementelor circuitelor integrate (CI) care sunt influențate de efectele induse la acțiunea radiației ionizante (RI).

Primele sisteme de modelare LEVEL (1, 2, 3) ale programului de simulare SPICE [7] au fost destinate calculării caracteristicilor tranzistorului metal-oxid-semiconductor (TMOS) cu canal lung (până la $1 \cdot 10^{-6}$ m). Cea mai răspândită versiune LEVEL3 are 15 parametri în curent static, care modelează cu o precizie considerabilă circuitele numerice și cu o precizie mult mai redusă - circuitele analogice. Se atestă unele restricții la modelarea curentului de sub prag (numai un parametru) și lipsește posibilitatea de aproximare a conductibilității canalului ($G_{ds}=dI_D/dV_{DS}$) utilizat la simularea dispozitivelor analogice. De asemenea, este imposibilă descrierea dependenței mobilității de deplasare inversă în substrat, înregistrându-se, în consecință, erori evidente la modelarea în regiunea de saturație. Cel mai mare neajuns îl reprezintă imposibilitatea de a modela efectele canalului îngust și ale celui scurt.

Pentru evitarea acestor dezavantaje, au fost elaborate sistemele BSIM și BSIM2, în care este inclus un ansamblu de parametri ce modelează efectele canalului îngust și ale celui scurt. Însă un dezavantaj al acestor sisteme constă în dificultatea descrierii mai multor parametri din punct de vedere fizic, parametri ce nu pot lua valori implicite, iar rezultatele obținute nu pot fi controlate în dependență de valorile concrete ale parametrilor etc. Toate aceste dificultăți provoacă obținerea unor mari dispersii ale rezultatelor modelării.

Pentru evitarea lacunelor menționate mai sus, a fost elaborat sistemul BSIM3 [8], similar cu modelul LEVEL3 al programului SPICE. Dimensiunile geometrice ale BSIM3 sunt incluse în ecuațiile modelelor elementelor ca și în LEVEL2 și LEVEL3 ale programului SPICE. Numărul parametrilor este de ~30, majoritatea lor având interpretare fizică. În realitate numărul parametrilor este mai mare (>100), însă aceștia, în majoritatea lor, nu necesită să fie optimizați. Dezavantajul acestui sistem îl reprezintă imposibilitatea de recalculare a rezultatelor modelării diverselor dimensiuni geometrice ale elementelor.

4. TRATAREA IERARHICĂ A EXTRAGERII PARAMETRILOR

După cum am menționat, sistemele modelelor se caracterizează printr-o serie mare de parametri. De menționat, totodată, că nu toți parametrii sunt echivalenți. Unii parametri descriu efectele de gradul întâi, alții reprezintă doar niște coeficienți de reglare neînsemnați și au o pondere mai mică. Marea majoritate a parametrilor, în esență, nu sunt sensibili la acțiunea RI (de exemplu, dimensiunile topologice).

În acest caz e necesar să fie luate în considerație două aspecte principale. Primul – mulți parametri sunt empirici și nu au o interpretare fizică clară. Al doilea – procedura de optimizare are un caracter formal și nu este obligatoriu ca rezultatele obținute să aibă valori fizice bine determinate. Deci, optimizarea formală a tuturor parametrilor contribuie la efectuarea unui volum de calcule foarte mare, implicit și rezultate greșite. Rezultă că, în procesul de calcul, folosirea principiului preciziei formale contribuie la înregistrarea unor erori considerabile și la interpretări incorecte [9].

Soluția acestei situații ar putea-o constitui tratarea ierarhică a extragerii parametrilor. La început, este necesar de a evidenția parametrii relevanți de gradul întâi, cum sunt tensiunea de prag, mobilitatea, panta etc. De menționat că TMOS rezistivi la acțiunea RI rămân a fi până în prezent cei cu canal lung ($\geq 0,8 \cdot 10^{-6}$ m) și numărul de parametri esențiali pentru aceștia se micșorează spontan. În asemenea condiții, este rațională utilizarea unui model mult mai simplu – LEVEL3, cu un ansamblu de parametri mai redus.

5. PROCEDURA MATEMATICĂ DE EXTRAGERE A PARAMETRILOR

Presupunem că a fost măsurat un ansamblu de n valori ale curenților ($m_1 \dots m_n$) pentru diverse valori ale tensiunii ($v_1 \dots v_n$). Extragerea parametrilor se efectuează prin intermediul metodei celor mai mici pătrate [5]. Pentru descrierea rezultatelor experimentale avem un oarecare model cu un ansamblu de parametri ce prognozează valorile curenților în punctele date în forma ($s_1 \dots s_n$).

Construim funcția-scop sub forma:

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [W_i(s_i - m_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (W_i m_i)^2} \right), \quad (1)$$

în care: W_i - coeficienți care evidențiază importanța sau veridicitatea unor puncte experimentale.

Prognostarea modelului depinde de ansamblul m al parametrilor

$$s_i = f(v_i, p_1 \dots p_m) \quad (2)$$

Funcția-scop reprezintă abaterea medie pătratică a punctelor experimentale, în dependență de rezultatele modelării prognozei la alegerea parametrilor dați. Funcția-scop poate fi expusă în altă formă:

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [W_i(s_i - m_{\min})]^2}{\sum_{i=1}^n (W_i m_{\min})^2} \right), \quad (3)$$

în care: m_{\min} - valoarea minimă absolută măsurată.

Astfel se procedează în cazul când numitorul normat este foarte mic sau egal cu zero. De menționat că înmulțitorul normat se introduce numai pentru comoditate și nu este obligatoriu.

Optimizarea constă în alegerea unor astfel de parametri numerici ai modelului, încât funcția-scop să fie minimă, ceea ce implică o descriere mai bună a rezultatelor experimentale prin intermediul modelului dat.

CONCLUZII

1. Este propusă soluționarea problemei pentru extragerea parametrilor de intrare a programului de simulare schemotehnică SPICE LEVEL3. Este prezentată metoda de soluționare a acesteia pentru calcularea parametrilor structurilor bipolare și MOS la acțiunea II.

2. S-a elaborat metoda de calcul a parametrilor tranzistoarelor bipolare și MOS din programul de simulare SPICE LEVEL3 la acțiunea II. Pe baza acestei metode de calcul s-a elaborat programul de extragere a parametrilor elementelor CI înainte și după iradiere.

3. Extragerea parametrilor pentru modelul mathematic SPICE LEVEL3 se efectuează din caracteristicile experimentale obținute înainte și după iradiere, calcularea dependențelor parametrilor în funcție de doza acumulată și determinarea parametrilor relevanți ai structurilor la iradiere.

4. Modelul propus este apropiat de modelul SPICE și permite minimizarea diferențelor dintre valorile experimentale și cele modelate în toate punctele caracteristicilor de intrare și ieșire.

Bibliografie

1. **Popov V.D.** *Radiatziionnaya fizika priborov so structuroj metall-dielektrik-poluprovodnik.* M.: Izd. MIFI, 180 s., 1984.
2. **Pershenkov V.S., Popov V.D., Shal'nov A.V.** *Poverhnostnye radiatziionnye efektz v elementah integral'nyz mikroshem.* M.: Energoatomizdat, 256 s., 1988.
3. **Griscom D. L.** *Diffusion of radiolitic molecular hydrogen as a mechanism for the post-irradiation buildup of interface states in SiO₂-on-Si structures.* *J.Appl.Phys.*, vol. 58, N 7, p. 2524-2533, 1988.
4. **Rusanovschi V.** *Acțiunea radiației ionizante asupra structurii MOS.* Monografie, 180 p, AGEPI, Chișinău. 2004.
5. **Korn G., Korn E.** *Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i ingenerov.* M.: Nauka, 831 s., 1977.
6. **Rusanovschi V.** *Prognostarea funcționării circuitelor integrate la iradiere.* // *Revista inventatorilor și cercetătorilor „Intellectus”*, nr. 2, p. 52-55, AGEPI. Chișinău, 2005.
7. **SPICE – simularea circuitelor analogice.** *Noua eră în inginerie.* București, Ed. Militară, 181 p., 1994.
8. **BSIM 3.3.** *Manual, Berkley, SUA, 2000.*
9. **Rusanovschi V.** *Imitatzionnoe modelirovanie logicheskikh elementov pri vozdejstvii ioniziruyushhego izlucheniya.* *Dissertatziya na soiskanie stepeni d.t.n. Vladimir, Rossiya, 276 s., 2010.*

Recomandat spre publicare: 12.04.2013.