

Sistem informațional de prelucrare și înregistrare a parametrilor stratului epitaxial din GaAs

Ion FIODOROV*, Bartolomeu IZVOREANU*, Arcadie CERCEL*, Simion BARANOV**

*Technical University of Moldova; fiodorov_ion@yahoo.com

**S.A. Centrul de Știință și Inginerie "InformInstrument"

Abstract: În lucrare se prezintă un sistem informațional destinat pentru măsurarea în regim automat a profilului de distribuție a impurităților în adâncimea structurilor epitaxiale din arsenură de galiu, cu afișarea pe ecranul monitorului, înregistrarea în baza de date și imprimarea parametrilor măsurăți sub formă de blank standard. În blank sunt incluse următoarele date: concentrația purtătorilor de sarcină, grosimea stratului epitaxial, tensiunea de străpungere și rezistența specifică. Măsurarea se efectuează în baza metodei caracteristicilor volt-faradice.

Cuvinte-cheie: strat epitaxial; metoda caracteristicilor volt-faradice (V-C); semiconductor; sarcină spațială.

I. INTRODUCERE

Structurile epitaxiale din semiconductori în baza arsenurii de galiu, siliciu, germaniu și altele sunt pe larg utilizate în electronică, optoelectronică și nanoelectronică. Anume în baza acestor materiale sunt produse dispozitivele semiconductoare moderne. O etapă importantă în procesul de producere a dispozitivelor semiconductoare o reprezintă etapa de testare a parametrilor structurilor epitaxiale, de care, în mare măsură, depinde calitatea dispozitivelor. Automatizarea procesului de măsurare și înregistrare a parametrilor constructivi și electrofizici ai stratului epitaxial din GaAs reprezintă tematica acestei lucrări.

II. METODA EXPERIMENTALĂ DE MĂSURARE A PARAMETRILOR STRATULUI EPITAXIAL

În prezent pentru măsurarea parametrilor materialelor semiconductoare sunt utilizate mai multe metode. Printre ele putem menționa metoda caracteristicilor volt-faradice (V-C) [1].

Metoda se bazează pe măsurarea parametrilor electrici ai barierei Shotki, ce se formează la suprafața structurii epitaxiale în locul de contact cu mercurul furnizat prin sonda de măsurare a manipulatorului cu mercur [1], [2].

În calitate de al doilea contact electric se folosește a doua sondă ajutătoare cu mercur, suprafața căreia depășește semnificativ (de 100 ori) suprafața sondei de măsurare, ceea ce permite de a neglija acțiunea caracteristicilor electrice a sondei ajutătoare asupra rezultatelor măsurării.

La sonda de măsurare față de contactul ajutător se aplică o tensiune continuă inversă. În rezultat în zona de contact se formează un domeniu al sarcinii spațiale, grosimea căruia depinde atât de mărimea tensiunii aplicate, cât și de concentrația impurităților în stratul sarcinii spațiale.

Din punct de vedere electric această zonă a sarcinii spațiale poate fi privită ca un condensator cu scurgere, valoarea capacității căruia

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d}, \quad (1)$$

unde C este capacitatea sondelor de măsurare; $\varepsilon, \varepsilon_0$ - constanta dielectrică a semiconductorului și a vidului

respectiv; s - suprafața sondei de măsurare; d - grosimea stratului sarcinii spațiale.

Legătura capacității barierei Shotki cu grosimea stratului sarcinii spațiale permite, cu ajutorul măsurărilor volt-faradice, în baza expresiei (1), de a o determina pe ultima pentru orice deplasare de tensiune dată. În același timp, după cum s-a menționat mai sus, variația capacității barierei față de tensiunea de deplasare, depinde de concentrația impurităților în sarcina spațială.

Acest fapt permite de a determina simultan cu grosimea sarcinii spațiale și, concentrația purtătorilor de sarcină la hotarele lui [1], [3]

$$N = \frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0qs^2} \frac{dU}{d(C^{-2})}, \quad (2)$$

unde N reprezintă concentrația impurităților; q - sarcina electronului; U - tensiunea de deplasare.

Astfel metoda volt-faradică prin utilizarea expresiilor (1) și (2) permite măsurarea profilului de dopare a structurii epitaxiale, iar printr-o prelucrare matematică respectivă și determinarea parametrilor lui.

III. ALGORITMI DE MĂSURARE ȘI PRELUCRARE A DATELOR ȘI MIJLOACELE DE IMPLEMENTARE ALE ACESTORA

Măsurarea se efectuează cu ajutorul măsurătorului digital E7-12, care se conectează cu calculatorul prin intermediul unui bloc electronic de racordare.

Algoritmul de măsurare [2], [4] constă în instalarea regimului de măsurare și aplicarea în mod consecutiv a tensiunii de deplasare de la 0 până la 40 V, cu pasul 0,1 V în diapazonul (0-1) V și cu pasul 1 V în diapazonul (1-40) V.

Pentru fiecare tensiune de deplasare se efectuează măsurarea capacității barierei și tangenta pierderilor dielectrice. Rezultatul măsurărilor se înregistrează sub formă de masive de date.

Apoi se analizează elementele acestor masive, pentru a determina posibilitatea prelucrării lor. Se folosesc două criterii generale de analiză: este necesar ca tangenta pierderilor dielectrice să fie mică (mai mică de 4,5) și, odată cu creșterea tensiunii de deplasare, capacitatea să se micșoreze consecutiv (mai exact nu se permite mărirea capacității în punctul următor față de cel precedent mai mult decât cu 1 pΦ).

Masivele create sunt prelucrate, în conformitate cu următorii algoritmi:

Algoritm 1: Masivele capacităţii şi tensiunii se transformă în masive de concentraţie a impurităţilor şi de grosime a stratului sarcinii spaţiale, determinate în conformitate cu expresiile (1) şi (2), utilizând metoda diferenţialelor finite pentru obţinerea derivatei $dU/(dC^{-2})$. Pasul de transformare este egal cu pasul de măsurare. Profilul de dopare obţinut se afişează pe ecranul monitorului sau se imprimă în scară logaritmică dublă.

Algoritm 2: Determină concentraţia impurităţilor după 2 puncte a dependenţei capacităţii de tensiune, iar după ultima valoare a capacităţii, măsurată corect, se determină tensiunea de străpungere şi grosimea stratului epitaxial. Pentru calcule se folosesc aceleaşi expresii (1) şi (2).

Algoritmul are două criterii suplimentare de determinare a posibilităţii de măsurare corectă. Se verifică dacă punctele alese pentru determinarea concentraţiei sunt incluse în domeniul de aplicabilitate a metodei (fig.1), altfel măsurarea se consideră imposibilă. Se verifică dacă s-a produs străpungerea structurii în procesul de măsurare. Dacă ultimul punct măsurat corespunde tensiunii de 39,9V, atunci străpungerea nu s-a produs şi datele despre tensiunea de străpungere nu se afişează.

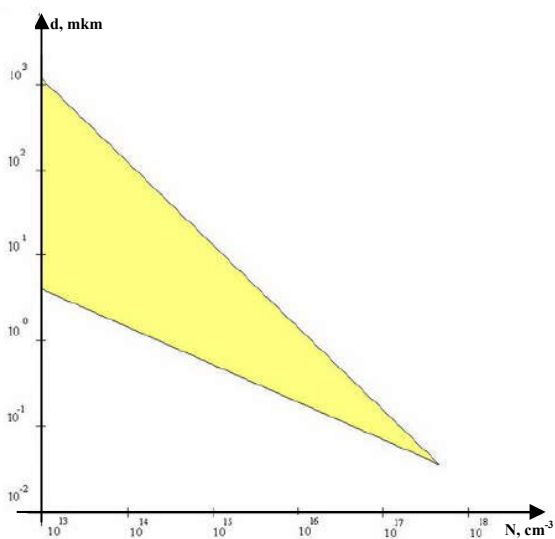


Fig. 1. Domeniul de aplicabilitate a metodei.

Structura generală a programului se bazează pe necesitatea măsurării a câtorva seturi de structuri epitaxiale (de exemplu în cutii) cu afişarea informaţiei sumare referitoare la fiecare set. Prima parte a programului este destinată pentru calibrarea dispozitivului şi include măsurarea capacităţii parazitare şi a capacităţii modelului standard. Apoi se introduce informaţia necesară pentru completarea tabelului standard de ieşire a rezultatelor măsurării. Următoarea parte a programului efectuează configurarea blocului de prelucrare a programului. Ea include alegerea materialului semiconductorului măsurat, a algoritmului de prelucrare şi a datelor ce urmează a fi introduse în tabelul rezultat. După aceasta programul se consideră a fi configurat şi are loc trecerea în regimul de măsurare a setului de structuri epitaxiale, ce se termină la comanda operatorului după

măsurarea ultimului model din setul respectiv. În procesul de măsurare informaţia necesară, ce ţine de obţinerea şi prelucrarea datelor experimentale se afişează pe ecranul monitorului, iar după finisarea acestuia, tabelul standard cu rezultatele măsurărilor poate fi stocat în baza de date, cu posibilitatea imprimării ulterioare pe hârtie.

Schema-bloc a algoritmului de funcţionare a aplicaţiei elaborate este prezentată în fig.2.

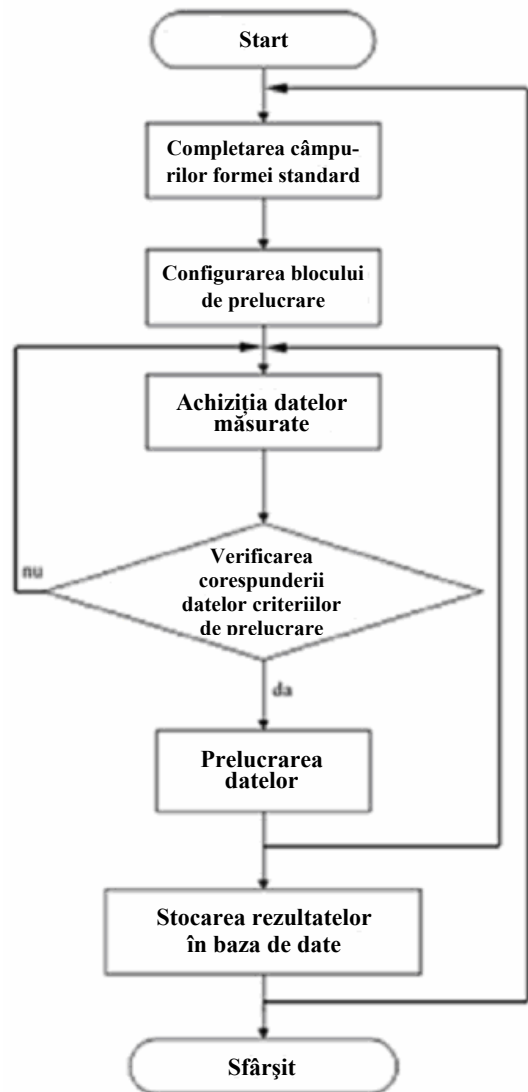


Fig.2. Schema-bloc a algoritmului aplicaţiei.

Aplicaţia a fost elaborată în mediul Microsoft Visual C# 2005 Express Edition for the Microsoft .NET, care este un mediu de programare foarte popular. De la predecesorii săi: C++ şi Java – unele dintre cele mai utilizate limbaje, C# a preluat cele mai bune calităţi şi totodată a înglobat cele mai noi elaborări din domeniul de proiectare a limbajelor de programare [5]. Aşa, de exemplu, deoarece C# utilizează resursele sistemului .Net Framework, codul lui este în cea mai mare măsură transferabil şi poate fi utilizat la elaborarea complexelor de programme şi a unui mediu multilingvistic, adică componentele software elaborate în C#, sunt compatibile cu codul scris în alt limbaj, dacă el, de asemenea, este destinat pentru .NET Framework. Alt avantaj al C# este simplitatea elaborării aplicaţiilor grafice, care pot fi

alcătuite utilizând setul standard de elemente de ferestre din sistemul de operare Windows.

În calitate de bază de date a fost utilizat motorul încorporat al bazelor de date SQLite. Cuvântul „încorporat” presupune, că SQLite nu utilizează structura client-server, adică motorul (o parte a codului-program destinată pentru efectuarea unei sarcini aplicative concrete) SQLite nu este un proces care lucrează separat, însă pune la dispoziție o bibliotecă, cu care programul conlucrează, și motorul devine o parte componentă a programului [6]. Astfel, în calitate de protocol de comunicație sunt utilizate chemările funcțiilor bibliotecii SQLite. O astfel de abordare micșorează timpul de răspuns și simplifică programul. SQLite păstrează toată baza de date într-un singur fișier standard pe același calculator, unde rulează programul.

III. SISTEM INFORMAȚIONAL DE PRELUCRARE ȘI ÎNREGISTRARE A PARAMETRIILOR STRUCTURILOR EPITAXIALE DIN GaAs

La lansarea programului apare fereastra de bază a aplicației (fig.3). Interfața cu utilizatorul este alcătuită în limba engleză.

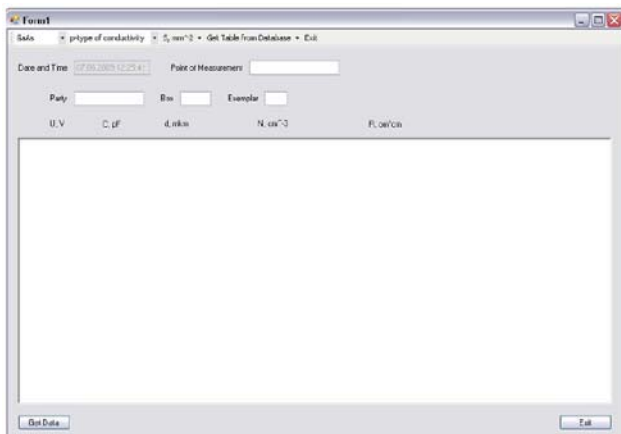


Fig.3. Fereastra de bază la lansare.

Structura generală a programului se bazează pe necesitatea măsurării parametrilor structurilor epitaxiale structurate în seturi de cutii. Înainte de a începe măsurarea propriu-zisă, este necesar de a introduce datele despre setul de structuri în câmpurile: *Party* (setul), *Box* (cutia), *Exemplar* (exemplarul), *Point of Measurement* (punctul de măsurare). În câmpul *Date and Time* automat se indică data și timpul curent, corespunzătoare datei și timpului de sistem (fig.3).

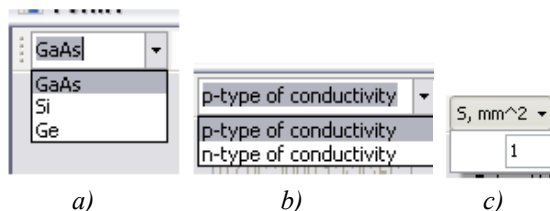


Fig.4. Configurarea blocului de prelucrare.

a) – materialul semiconductorului; b) – tipul conductibilității; c) – suprafața sondei de măsurare.

De asemenea, operatorul trebuie să indice materialul semiconductorului (de exemplu GaAs), tipul conductibilității (*p* sau *n*) și suprafața sondei de măsurare cu mercur (inițial $s = 1 \text{ mm}^2$). Setarea acestor parametri se efectuează în partea de sus a ferestrei aplicației (fig.4).

După introducerea informației necesare, operatorul poate efectua achiziția datelor de la dispozitivul de măsurare prin intermediul tastei *Get Data*, amplasată în partea de jos a ferestrei. La tastarea ei se citește informația din portul serial COM1, și totodată se verifică posibilitatea de prelucrare a datelor recepționate. Dacă rezultatul verificării este pozitiv, atunci în fereastra de bază a aplicației sunt reprezentate datele de măsurare obținute (fig.5).

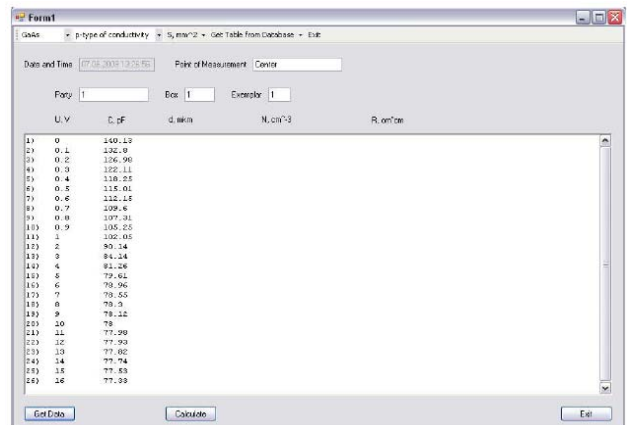


Fig.5. Fereastra aplicației după recepționarea datelor.

După recepționarea datelor măsurate: tensiunea de deplasare aplicată - *U* și capacitatea structurii epitaxiale - *C*, în partea de jos a ferestrei apare tasta *Calculate* (fig.5). La tastarea ei se efectuează calculul parametrilor în conformitate cu algoritmi 1 și 2 și se afișează rezultatele sub formă de trei mase adăugătoare: *d* este grosimea stratului epitaxial; *N* – concentrația impurităților; *R* – rezistența specifică, pentru primul algoritim, iar în partea de jos a ferestrei de lucru: concentrația impurităților - *N*; tensiunea de străpungere - *U*; grosimea stratului epitaxial - *d* și rezistența specifică - *R*, după al doilea algoritim (fig.6).

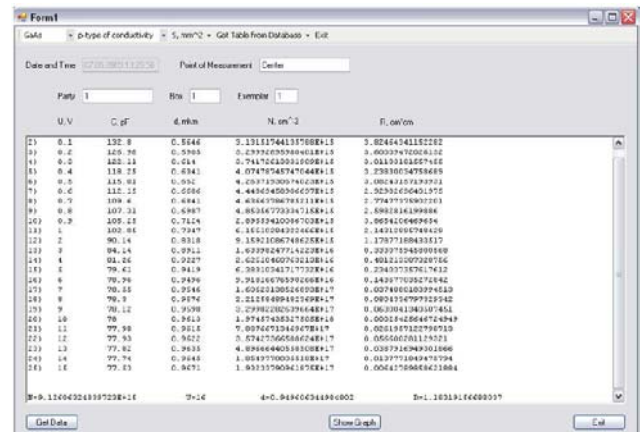


Fig.6. Fereastra aplicației după calculul parametrilor.

După efectuarea calculului putem viziona curba dependenței grosimii stratului epitaxial de concentrația impurităților $d = f(N)$ în domeniul de aplicare a metodei V-C. Pentru aceasta se utilizează tasta *Show Graph* (fig.6). Curba apare în aceeași fereastră de lucru (fig.7).

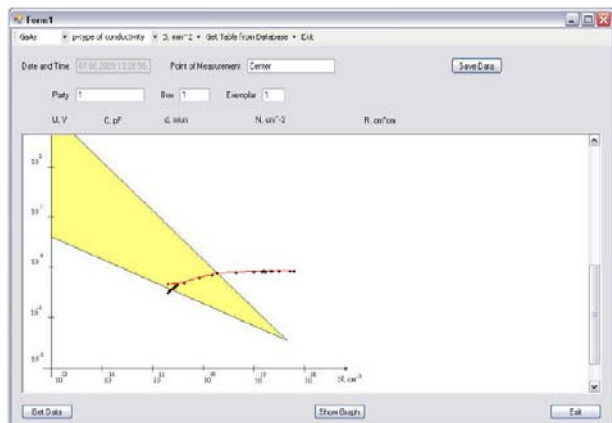


Fig.7. Reprezentarea graficului.

După îndeplinirea tuturor operațiilor de mai sus, operatorul poate memora datele experimentale și calculate în baza de date. Pentru aceasta servește tasta *Save Data*, amplasată în colțul de sus din dreapta a aplicației (fig.7). Pentru a vizualiza informația conținută în baza de date, este necesar de a indica setul (Party) și cutia (Box) în meniul *Get Table from Database*, amplasat în partea de sus a aplicației (fig.8).

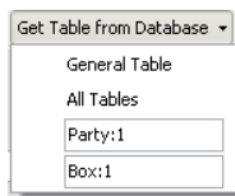


Fig.8. Meniul pentru extragerea informației din baza de date.

Pentru extragerea tabelului general, ce include parametrii tuturor structurilor epitaxiale din cutia selectată, este necesar de a tasta *General Table*. Tabelul general conține datele calculate în conformitate cu al doilea algoritm. Pentru a extrage toată informația referitoare la această cutie (rezultatul calculului în conformitate cu ambii algoritmi și curbele profilului de dopare) este necesar de a tasta *All Tables* (fig. 8). În fig.9 este prezentat un fragment al tabelului general cu datele structurilor din prima cutie.

Party	Box	Example	U, V	C, F	d, nm	N, cm ⁻³	R, ohm/cm
Genere	1	1	8.3200624897338415	1.6	0.949062449848102	1.11131350589897	
Genere	1	1	8.4941898982018915	1.6	1.0202392218948	1.11732846199827	
Genere	1	1	8.972920176318110	1.6	1.10993222218192	0.9919171024998610	

Fig.9. Extragerea tabelului general din baza de date.

După extragerea informației din baza de date, ea poate fi imprimată. Pentru aceasta sunt utilizate tastele *Print General Table* sau *Print All Tables*, ce apar în partea dreaptă de sus a aplicației (fig.9).

Pentru a trece la următoarea măsurare este necesar de a reintroduce informația în câmpurile *Party*, *Box*, *Exemplar*, *Point of Measurement* și de a tasta *Get Data*. Pentru ieșirea din program servește tasta *Exit*, amplasată în partea dreaptă jos.

IV. CONCLUZII

Sistemul proiectat servește pentru automatizarea procesului de testare a structurilor epitaxiale din AsGa în baza metodei caracteristicilor volt-faradice, cu afișarea pe ecranul monitorului a profilului de dopare în scară logaritmică dublă și, totodată prevede înregistrarea în baza de date și imprimarea parametrilor mășurați sub formă de blank standard. În blank sunt incluși următorii parametri: concentrația purtătorilor de sarcină, grosimea stratului epitaxial, tensiunea de străpungere și rezistența specifică. Diapazonul de măsurare a concentrației (10^{12} - 10^{17}) cm⁻³. Diapazonul grosimilor măsurabile depinde de valoarea concentrației purtătorilor de sarcină și se determină grafic. Diapazonul tensiunii de străpungere (1- 40) V.

Aplicația este simplă în utilizare, și deci nu necesită o pregătire teoretică avansată a operatorului. De asemenea, datorită utilizării bibliotecii SQLite pentru organizarea bazei de date, aplicația ocupă un volum mic de memorie.

Utilizarea unui astfel de sistem pentru măsurarea parametrilor structurilor epitaxiale va aduce la creșterea productivității și a calității producerii dispozitivelor electronice din aceste structuri.

REFERENCES

- [1] Абрамов В.Б., Карпанин О.В., Медведев С.П., Метальников А.М., Печерская Р.М. *Исследование свойств полупроводников методом вольт-фарадных характеристик*. Методические указания к лабораторным работам. Пенза-2004.
- [2] Зи С. *Физика полупроводниковых приборов*. В 2-х кн. – М.: Мир, 1984. 456 с.
- [3] Пасынков В.В., Чиркин Л.К. *Полупроводниковые приборы*. Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987.
- [4] Палатник Л. С., Папилов И. И. *Эпитаксиальные пленки*. – М.: Наука, 1971.- 480 с.
- [5] Шилдт Г. *С#: учебный курс*. – СПб: Питер, 2003.- 512 с.
- [6] Лаврищева Е. М., Петрухин В. А. *Методы и средства инженерии программного обеспечения*. – М.: Московский физико-технический институт, 2006. – 304 с.