

Sistem de control automat a parametrilor stratului epitaxial din GaAs

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

Universitatea Tehnică a Moldovei,

S.A. Centrul de Ştiinţă şi Inginerie "InformInstrument" *

arcadie.md@gmail.com, izvor@mail.utm.md

Abstract — În lucrarea de faţă se prezintă un dispozitiv de comandă şi achiziţie de date pentru aparatul de măsură E7-12, ce permite racordarea acestuia la calculatorul personal. Scopul urmărit a fost automatizarea măsurărilor necesare pentru determinarea parametrilor stratului epitaxial din arseniură de galiu. Obţinerea parametrilor stratului epitaxial se face prin metoda volt-faradică. Dispozitivul setează tensiunea de polarizare cu pasul 0.1 V în intervalul 0-1 V şi cu pasul 1 V în intervalul 1-40 V. Pentru fiecare din aceste valori ale tensiunii, dispozitivul va cere de la aparatul de măsură valoarea capacităţii C şi a tangentei unghiului de pierderi D . Aceste valori vor fi trimise în calculator, va fi construită caracteristica volt-faradică şi vor fi determinaţi parametrii stratului epitaxial: concentraţia purtătorilor de sarcină, grosimea stratului, tensiunea de străpungere. Pentru a putea comunica cu aparatul de măsură a fost necesară implementarea protocolului GPIB (General Purpose Interface Bus). La baza dispozitivului proiectat se află un microcontrolor AVR – Atmega8.

Cuvinte cheie — automatizarea măsurărilor, aparat de măsură E7-12, metoda volt-faradică, protocolul GPIB (IEEE-488), parametrii stratului epitaxial.

I. INTRODUCERE

Pentru determinarea profilului de dopare şi a parametrilor stratului epitaxial din GaAs folosind metoda volt-faradică, avem nevoie de valoarea capacităţii şi a tangentei unghiului de pierderi a „condensatorului” format în zona de contact a suprafeţei de mercur a sondei de măsurare şi a stratului epitaxial, pentru diferite valori a tensiunii de polarizare.

Pentru aceasta, operatorul uman trebuie să urmeze următorii paşi: setarea regimului de măsurare a aparatul de măsură (E7-12), setarea tensiunii de polarizare 0 V, efectuarea unei măsurări, notarea valorilor capacităţii C şi a tangentei unghiului de pierderi D pentru tensiunea de polarizare dată, setarea tensiunii de polarizare 0.1 V, citirea şi notarea indicaţiilor aparatului de măsură, şi așa mai departe, cu pasul 0.1 V până la 1 V şi cu pasul 1 V în intervalul 1-40 V.

După cum se observă, acest proces este anevoios şi durează mult timp. Sunt necesare 50 de măsurări, doar pentru o singură regiune a stratului epitaxial. Pentru a obţine un profil de dopare complet sunt necesare patru sau cinci serii de măsurări în diferite regiuni. Astfel, volumul de operaţii efectuat de către un operator uman este enorm, iar operaţiile sunt foarte migăloase. De asemenea, la un volum mare de date sunt inevitabile erorile introduse de factorul uman.

Pentru soluţionarea acestor probleme s-a decis automatizarea procesului de măsurare, de analiză a rezultatelor, de obţinere a profilului de dopare şi a parametrilor stratului epitaxial.

II. DESCRIEREA INSTALAŢIEI DE MĂSURARE

Instalaţia de măsurare este prezentată în fig. 1 şi este compusă din: 1) sonde de măsurare cu mercur, 2) aparat de

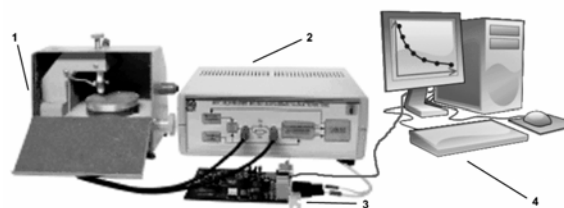


Fig.1. Prezentare generală.

măsură E7-12, 3) dispozitivul de racordare proiectat, 4) calculator.

Sondele cu mercur realizează contactul electric cu stratul epitaxial. Există posibilitatea reglării înălțimii coloanei de mercur în sondele de sticlă.

Aparatul de măsură E7-12 permite măsurarea rezistențelor, inductanțelor și a capacităților. Este posibilă măsurarea impedanței/admitanței folosind schemele echivalente CG , LR , CD sau LD .

La comutarea regimului „x0.1” este posibilă efectuarea măsurărilor în care tensiunea pe obiectul măsurat nu depășește (25±5) mV. De asemenea, este posibilă setarea tensiunii de polarizare de la o sursă internă în intervalul 0-40 V, sau de la o sursă externă până la 200 V.

Frecvența de lucru a aparatului de măsură este 1 MHz. Diapazonul de măsurare este împărțit în cinci intervale, dar este posibilă și alegerea automată a intervalului de măsurare. Semnul valorilor măsurate se detectează automat. Durata unei măsurări nu depășește 500 ms.

Regimul nominal de funcționare se atinge după 30 min. Durata de funcționare non-stop cu păstrarea parametrilor de funcționare nominali nu trebuie să depășească 8 ore.

Aparatul permite controlul din exterior și asigură aceeași funcționalitate în regimul de comandă de la distanță ca și organele de reglare de pe panoul frontal. Recepționarea comenzilor de către acesta și transmiterea rezultatelor măsurărilor se face prin intermediul canalului GPIB, cu respectarea standardului IEEE-488.

III. METODA VOLT-FARADICĂ DE DETERMINARE A PARAMETRIILOR STRATULUI EPITAXIAL

Metoda constă în măsurarea parametrilor electrici ai barierei Schottky, care se formează în punctul de contact al sondei de măsurare cu suprafața stratului epitaxial. Al doilea contact electric îl formează o sondă ajutătoare, cu o suprafață de o sută de ori mai mare decât cea de măsurare, ce permite eliminarea influenței parametrilor electrici a acestei sonde asupra măsurărilor.

Pe sonda de măsurare se aplică un potențial negativ față de sonda ajutătoare. Astfel, în locul de contact se formează o zonă cu o sarcină electrică volumetrică. Grosimea acesteia depinde atât de diferența de potențial dintre sonda de măsurare și cea ajutătoare, cât și de concentrația purtătorilor de sarcină în acel volum.

Din punct de vedere electric, această zonă poate fi privită ca un condensator cu pierderi. Mărimea capacității acestui condensator se determină conform relației

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

unde C este capacitatea, ε , ε_0 - constanta dielectrică a semiconductorului, respectiv a vidului, S - suprafața sondei de măsurare, d - grosimea stratului sarcinii volumetrică.

Pierderile în acest condensator pot fi neglijate la frecvența de măsurare de 1 MHz, având în vedere că bariera Schottky este polarizată invers.

Relația dintre capacitatea barierei Schottky și grosimea stratului sarcinii volumetrică (1) permite determinarea grosimii acestui strat pentru orice valoare a tensiunii de polarizare. În același timp, variația capacității barierei în funcție de tensiunea de polarizare depinde și de concentrația purtătorilor de sarcină în regiunea dată. Aceasta permite să determinăm concentrația purtătorilor de sarcină cu ajutorul relației:

$$N = \frac{2}{\varepsilon \varepsilon_0 q S^2} \cdot \frac{dU}{d\left(\frac{1}{C^2}\right)} \quad (2)$$

unde: N este concentrația purtătorilor de sarcină, q - sarcina electronului, U - tensiunea de polarizare.

Metoda volt-faradică permite determinarea profilului de dopare a structurii epitaxiale, iar după o prelucrare matematică a datelor obținute, și a altor parametri ai acesteia.

IV. PROTOCOLUL GPIB (IEEE-488)

Pentru realizarea comunicării între aparatul de măsură (prin portul GPIB, standardul IEEE-488) și calculator (prin portul serial, standardul RS-232) s-a proiectat un dispozitiv de racordare, bazat pe un microcontroler Atmega8 din familia AVR - ATMEL.

IEEE-488 este un standard de comunicație digitală pe distanțe scurte ce se află în utilizare de peste 30 de ani (creat la sfârșitul anilor '60 și standardizat în 1975). Inițial creat pentru a fi utilizat cu echipamente de testare automată, standardul este încă folosit pe scară largă cu acest scop. IEEE-488 permite ca o singură magistrală paralelă de 8 biți de date să fie împărțită de până la 15 dispozitive. Magistrala IEEE-488 are 16 linii de semnal, dintre care 8 bidirecționale, folosite pentru transferul de date, 3 pentru sincronizare și 5 pentru managementul

magistralei, plus 8 linii de masă. Pentru conectarea dispozitivelor se folosesc conectori cu 24 de pini (fig. 2).

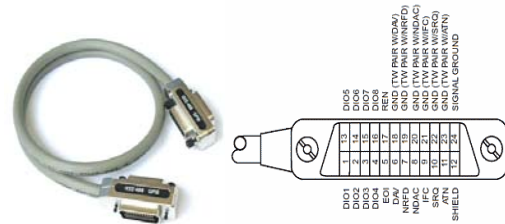


Fig.2. Cablu cu conectori GPIB și semnificația pinilor

Standardul GPIB determină 3 clase de dispozitive conectate la magistrală: *Ascultător (Listener)*, *Vorbitor (Talker)* și *Controler (System Controller)*. În orice moment de timp, un dispozitiv se poate afla în una din cele trei clase și poate fi desemnat de controlerul de sistem ca *Ascultător*, *Vorbitor* sau *Controler* în orice moment de timp. Pe o magistrală se pot afla un număr arbitrar de ascultători și vorbitori și numai un singur controler. Acesta din urmă, în caz de necesitate, poate desemna un alt dispozitiv să ia rolul de controler, renunțând la acest statut.

Pentru comunicarea între dispozitivele de pe magistrală se folosește un mecanism de sincronizare, realizat cu ajutorul semnalelor: *DAV* (Data valid), *NRFD* (Not ready for data) și *NDAC* (Not data accepted).

Mecanismul de sincronizare este prezentat în fig. 3.

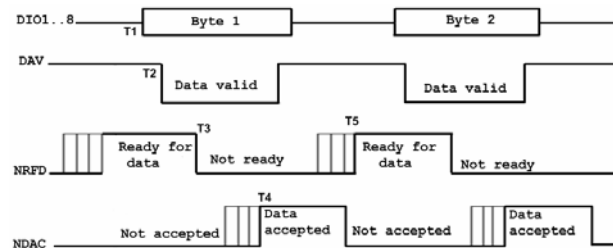


Fig.3. Mecanismul de sincronizare

Important: liniile magistrale folosesc logica TTL negativă, deci 0 logic e reprezentat de o tensiune de +5V, iar 1 logic e reprezentat de 0 V!

Transmiterea octeților de informație și sincronizarea are loc în modul următor: în momentul de timp T1, vorbitorul observă că linia *NRFD* e în 0 logic, deci ascultătorul e gata să primească alte date. În acest moment de timp, vorbitorul setează liniile de date *DIO1..DIO8* și așteaptă până la stabilizarea liniilor (momentul T2). În momentul T2, vorbitorul trece linia *DAV* în 1 logic, semnificând că datele de pe linie sunt valide. În acest moment, ascultătorul începe citirea datelor de pe linie, simultan cu trecerea liniei *NRFD* în 1, indicând faptul că nu mai poate accepta alte date. După ce octetul de date a fost citit, ascultătorul setează linia *NDAC* în 1 logic (momentul T4). În timp ce ascultătorul prelucrează datele, linia *NRFD* rămâne în 1 logic, iar *NDAC* în 0 logic. Vorbitorul poate înlătura octetul de date de pe liniile *DIO1..DIO8*. După ce octetul de date a fost prelucrat, ascultătorul va trece linia *NDAC* în 1 logic, iar *NRFD* în 0 logic, indicând faptul că este gata să primească alt octet de date (momentul T5).

În afară de cele 3 linii de sincronizare se mai folosesc 5 linii de stare. Semnificația lor este următoarea: *ATN* (*Attention*) - controlerul de sistem folosește această linie

pentru a indica faptul că pe magistrala de date *DIO1..DIO8* e prezent un octet de comandă, nu de date; *SRQ (Service Request)* – cerere de deservire, indică faptul că unul din dispozitive are nevoie de atenția controlerului; *IFC (Interface Clear)* – este utilizat de controlerul de sistem pentru a aduce magistrala într-o stare cunoscută; *REN (Remote Enable)* – trece dispozitivul conectat la magistrală în regimul de control de la distanță. În acest regim dispozitivul va ignora setările de la panoul frontal și va putea fi comandat de la distanță; *EOI (End or Identify)* – este folosit de către vorbitor pentru a semnaliza transmiterea ultimului octet dintr-un mesaj sau de către controler, împreună cu *ATN*, pentru a iniția un sondaj paralel.

Un vorbitor poate pune pe magistrala de date octeți de date sau de comandă. Pentru ca octetul de pe magistrală să fie interpretat drept comandă, setarea acestuia se face împreună cu trecerea semnalului *ATN* în 1 logic. Aceste comenzi sunt recepționate și interpretate de toate dispozitivele conectate la magistrală, nu doar de ascultători.

Comenzile se împart în comenzi universale și comenzi de adresare. Comenzile universale sunt recepționate și prelucrate de către toate dispozitivele conectate la magistrală, indiferent de adresa care le-a fost atribuită. Comenzile de adresare sunt recepționate și prelucrate de dispozitivele ale căror adresă a coincis cu adresa inserată în octetul de comandă.

V. CODIFICAREA INFORMAȚIEI

Pentru setarea regimului de măsurare a tensiunii de polarizare sau pentru efectuarea unei măsurări trebuie să cunoaștem codul comenzii ce urmează a fi transmisă aparatului de măsură. Codificarea informației pentru aparatul de măsură E7-12 se face conform tabelelor 1 și 2. În tabelul 1 sunt prezentate cele mai importante comenzi.

Semnificația comenzilor este următoarea: *GET* – efectuarea unei măsurări; *LSN* – desemnează aparatul cu adresa *AAAAA* drept *ascultător*, *TLK* – desemnează aparatul cu adresa *AAAAA* drept *vorbitor*, *UNT* – dezactivarea *vorbitorilor*, *ULN* – dezactivarea *ascultătorilor*.

Cu *AAAAA* a fost notată adresa aparatului, iar pentru funcționarea corectă fiecare aparat trebuie să primească o adresă unică în intervalul 1-15 (00001-01111).

În tabelul 2 sunt prezentați octeții de date utilizați pentru a seta un anumit regim de funcționare a aparatului de măsurare.

TABELUL I. CODIFICAREA COMENZILOR

Comanda	Codul comenzii
	D8..D1
GET	000010x0
LSN	001AAAAA
TLK	010AAAAA
UNT	01011111
ULN	00111111

TABELUL II. CODIFICAREA INFORMAȚIEI. OCTEȚI DE DATE

Informația recepționată		D8..D1
Regim	Varianta	
Schema echivalentă	CG	0000xx11
	CD	0000xx01
	LR	0000xx10
	LD	0000xx00
Nivelul semnalului	x1	0001x1xx
	x0.1	0001x0xx
Intervalul de măsurare	Auto	00100000
	1	00101110
	2	00101101
	3	00101100
	4	00101011
Polarizare	U	01000000
	I	01001000
x10	N=0-9	0101n ₃ n ₂ n ₁ n ₀
x1	N=0-9	0110n ₃ n ₂ n ₁ n ₀
x0.1	N=0-3	011100n ₁ n ₀
Componenta reactivă		00111000
Componenta activă		00110000

După efectuarea unei măsurări, aparatul de măsură va transmite 11 octeți. Semnificația acestora este prezentată în tabelul 3.

TABELUL III. STRUCTURA INFORMAȚIEI IEȘIRE

Nr. Octeților					
1	2-6	7	8	9,10	11
Semn	Man-tisă	Sim-bol	Semn	Expo-nent	Unitatea de măsură
+	xxxxx	E	+	xx	C,L,R, G,D
-			-		

VI. SCHEMA DE PRINCIPIU ELECTRICĂ

Pentru comunicarea microcontrolerului cu portul serial al calculatorului este nevoie de un circuit de conversie între nivelele de tensiune TTL (0V, 5V) și RS232 (+12V, -12V). În calitate de circuit de conversie a fost folosit circuitul integrat MAX232. Pentru a fi posibilă programarea microcontrolerului pe placă e necesar accesul la pini *SCK(19)*, *MISO(18)*, *MOSI(17)*, *RESET(1)*, *VCC(7)*, *GND(8)*. Schema de principiu electrică este prezentată în fig. 4. Pini *D8..D1*, *DAV*, *NRFD*, *NDAC*, *ATN*, *SRQ*, *REN* de la microcontroler sunt conectați la pini cu același nume de la conectorul GPIB al aparatului de măsură E7-12.

Cablajul este prezentat în figura 5. Placa are 80x65 mm și este realizată într-un singur strat, cu excepția a câteva fire de legătură. Toate elementele sunt de tip „through hole”, ușor de lipit.

Alimentarea se face de la o sursă de curent continuu de 7-15 V. Există posibilitatea alimentării directe de la calculatorul personal.

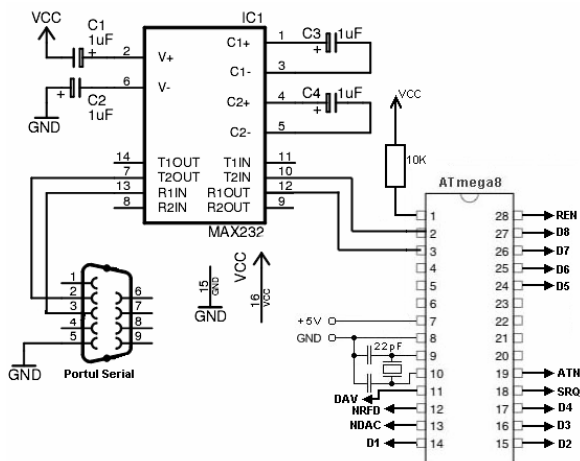


Fig.4. Schema de principiu electrică

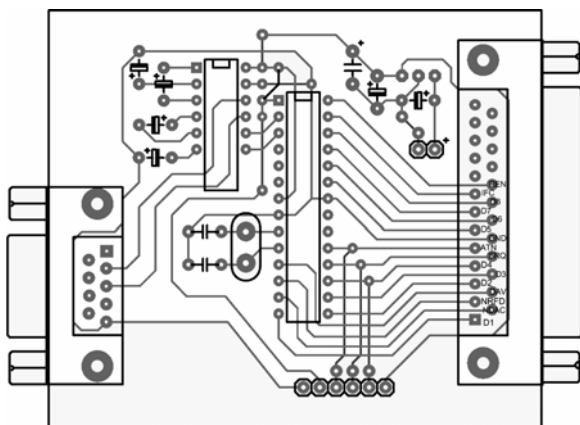


Fig.5. Cablajul imprimat.

VII. EXEMPLU DIN CODUL SURSĂ

Codul sursă a fost scris în limbajul de programare C. În calitate de mediu de dezvoltare a fost folosit AVR Studio cu WINAVR. În continuare este prezentat, pentru exemplificare, modul în care are loc transmiterea unui octet de date cu respectarea mecanismului de sincronizare. Setarea regimului de măsurare, a tensiunii de polarizare, a tipului componentei ce trebuie măsurată (activă, reactivă) se face prin trimiterea octetului de date corespunzător, conform tabelului 2. Transmiterea comenzilor de desemnare ca ascultător sau vorbitor, sau de efectuare a unei măsurări se face prin trecerea liniei ATN în 0 (1 în logica TTL negativă) și trimiterea octetului corespunzător comenzii, conform tabelului 1. Recepționarea unui octet se face în mod similar, dar cu inversarea rolurilor: aparatul de măsură va gestiona linia DAV și liniile de date D1..D8, iar calculatorul – liniile NRFD și NDAC.

```
// trimiterea unui octet
void GPIB_Send(char Data)
{
    // Așteptăm NDAC=0 (1 în logica TTL negativă)
    TimeOut=0; while(!NDAC && (TimeOut<100))
        { TimeOut++; _delay_us(5); }
    // Așteptăm NRFD=1 (0 în logica TTL negativă)
    TimeOut=0; while(!NRFD && (TimeOut<100))
        { TimeOut++; _delay_us(5); }
    // setarea octetului de date pe liniile D1..D8
    GPIB_DataSet(Data);
    DAV0; // semnalizarea validității acestuia
    // Așteptăm NRFD=0 (1 în logica TTL negativ)
    TimeOut=0; while(NRFD && (TimeOut<100))
        { TimeOut++; _delay_us(5); }
```

```
// Așteptăm NDAC=1 (0 în TTL negativ)
TimeOut=0; while(!NDAC && (TimeOut<100))
    { TimeOut++; _delay_us(5); }
DAV1; // octetul de date nu mai e valid
GPIB_DataRelease(); // eliberăm liniile de date
}
```

VIII. REZULTATE

Transmiterea valorilor obținute după o serie de măsurări se face în modul următor:

$U_0, C_0, D_0 \backslash n \backslash r$
 $U_1, C_1, D_1 \backslash n \backslash r$
 ...
 $U_n, C_n, D_n \backslash n \backslash r \backslash 0$

unde U_i , C_i , D_i reprezintă tensiunea de polarizare, valoarea măsurată a capacității și a tangentei unghiului de pierderi, respectiv.

În urma unei serii de măsurări au fost obținute rezultatele din fig. 6. O măsurare durează 500 ms, deci o serie din 50 măsurări va dura $2 \cdot 0.5s \cdot 50 = 50$ s, mult mai puțin decât dacă ar fi executate de un operator uman.

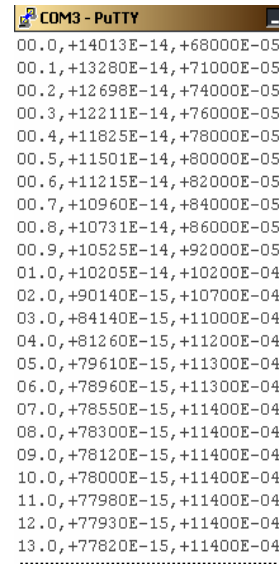


Fig.6. Rezultatul măsurărilor

IX. CONCLUZIE

Dispozitivul proiectat permite automatizarea procesului de efectuare a măsurărilor necesare pentru determinarea caracteristicii volt-faradice a stratului epitaxial și a parametrilor acesteia. Timpul în care are loc o serie de măsurări a fost redus de la 10-15 minute la 50 de secunde. În plus, prin eliminarea factorului uman din procesul de măsurare și notare a rezultatelor au fost eliminate erorile pe care le poate cauza acesta.

Utilizarea acestui dispozitiv este foarte simplă, programul din microcontroler poate fi modificat cu ușurință pentru alte scopuri și alte dispozitive ce au un canal GPIB (generatoare de semnal, osciloscop, spectrometre), iar o construcție simplă și un preț redus îl fac o soluție atractivă pentru un laborator.

X. BIBLIOGRAFIE

- [1] Izmeriteli L, C, R țifrovie. Tehniceskoe opisanie i instrukții po exploatații. – 2.724.011 TO, 1990.-155 s.
- [2] Ustanovka dlea izmerenia parametrov epitaxialinîh struktur volt-faradnîm metodom. Tehnicescoe opisanie i instrukții po exploatații. – 2.600.002 TO, 1987.- 27 s.
- [3] Resursă electronică: <http://en.wikipedia.org/wiki/GPIB>
- [4] Resursă electronică: http://www.itt-ltd.com/reference/ref_ieee488.html