

TEZĂ

prezentată la

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA

în vederea obținerii

Titlului de DOCTOR în specialitatea ELECTRONICĂ

de

Ing. HORIA CĂLIN CÂRSTEA

CONTRIBUȚII LA MĂSURAREA ȘI CONTROLUL AUTOMAT AL GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI DE NATURĂ DIFERITĂ DEPUSE SUCCESIV ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. TIBERIU MUREȘAN

TIMIȘOARA

1997

CUPRINS

INTRODUCERE	4
--------------------------	---

CAPITOLUL 1

IMPORTANȚA ȘI NECESITATEA MĂSURĂRII ȘI CONTROLULUI GROSIMII STATURILOR SUBȚIRI DEPUSE ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT	6
---	---

1.1. Procedee tehnologice de obținere a staturilor subțiri	6
1.2. Distribuția grosimii straturilor subțiri depuse pe suport plan	10
1.3. Cerințele impuse metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri	15
1.4. Importanța și necesitatea măsurării cu precizie a grosimii straturilor subțiri în microelectronică	16
1.5. Concluzii	21

CAPITOLUL 2

PRINCIPII ȘI METODE DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII SRATURILOR SUBȚIRI DEPUSE ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT	22
---	----

2.1. Metode de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri prin procedee mecanice	23
2.2. Metode de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri prin procedee optice	26
2.3. Metode de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri prin procedee radiometrice	34
2.4. Metode de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri prin procedee electrice	37
2.5. Concluzii	44

CAPITOLUL 3

METODĂ OPTIMALĂ DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII SRATURILOR SUBȚIRI DEPUSE SUCCESIV ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT	47
3.1. Metoda cuarțului rezonant	48
3.2. Creșterea preciziei la măsurarea grosimii straturilor subțiri utilizând metoda cuarțului rezonant	49
3.3. Metodă optimală de măsurare și control a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt	51
3.4. Evaluarea erorilor produse la măsurarea grosimii SS datorită poziționării traductorului în incinta vidată	55
a) Traductor poziționat în același plan cu suportul plachetă	55
b) Traductor poziționat într-un plan paralel cu suportul plachetă.	58
c) Traductor poziționat într-un plan tangent la sferile cu centrul în evaporator	60
3.5. Concluzii	62

CAPITOLUL 4

APARAT PENTRU MĂSURAREA ȘI CONTROLUL GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI DE NATURĂ DIFERITĂ DEPUSE SUCCESIV ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT	64
4.1. Configurația generală a aparatului	64
4.2. Funcționarea aparatului după schema bloc	67
4.3. Caracteristicile aparatului MGS 01	69
4.4. Concluzii	74

CAPITOLUL 5

SISTEM AUTOMAT DE CONDUCERE, COMANDĂ ȘI CONTROL A PARAMETRILOR DE PROCES AI UNEI INSTALAȚII INDUSTRIALE DE OBTINERE A SRATURILOR SUBȚIRI PRIN DEPUȘI SUCCESIVE ÎN VID ÎNALT	76
5.1. Configurația generală a sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces	76

5.2. Schema bloc și funcționarea sistemului automat de conducere a procesului tehnologic, comandă și control a parametrilor de proces	77
5.3. Schema de principiu a sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces	81
5.4. Programul “COMANDĂ ȘI CONTROL”	89
5.5. Concluzii	93

CAPITOLUL 6

TESTAREA ECHIPAMENTELOR REALIZATE ȘI PREZENTAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE	94
---	----

6.1. Testarea și experimentarea traductorului grosime-frecvență	94
6.2. Testarea și experimentarea aparatului MGS 01	97
6.3. Testarea și experimentarea echipamentului automat de conducere a parametrilor de proces	101
A. Testarea prin metode software	101
B. Testarea prin metode hardware	103
6.4. Concluzii	108

CAPITOLUL 7

CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CONCLUZII FINALE	109
---	-----

7.1. Contribuții originale	109
7.2. Concluzii finale	133

ANEXE	117
-----------------	-----

Anexa 1. Caracteristicile principalelor materiale utilizate sub formă de SS în microelectronică	117
Anexa 2. Schemele și ordinogramele de funcționare ale agregatelor AV/AE 100/500	119
Anexa 3. Arhitectura, conexiunile la capsulă și principalele modalități de operare ale microcontrolerului SAB 80C535	124
Anexa 4. Dispunerea componentelor sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces pe plăci	130
Anexa 5. Programul “COMANDĂ ȘI CONTROL”	133
Anexa 6. Lista simbolurilor și a prescurtărilor utilizate	168

BIBLIOGRAFIE	171
------------------------	-----

INTRODUCERE

Straturile subțiri (grosimi cuprinse în domeniul $10\text{Å} \div 1\mu\text{m}$) metalice, dielectrice, feromagnetice și semiconductoare, prezintă un interes deosebit, ca urmare a performanțelor obținute prin utilizarea acestora în domenii extrem de importante și variate. Cu materiale depuse sub formă de straturi subțiri (SS) se realizează în prezent filtre și oglinzi optice speciale, tensometre, detectoare de radiații, bolometre, baterii, solare, dispozitive electronice și optoelectronice, componente electronice pasive de precizie și înaltă frecvență, traductoare peliculare miniatură pentru robotică și numeroase dispozitive solicitate de industrie și cercetare, în domenii de vârf.

Trebuie menționat că în ultimii ani, studiarea diferitelor materiale sub formă de straturi subțiri a devenit o metodă modernă de cercetare. În cele mai multe cazuri proprietățile fizice, chimice și structurale ale straturilor subțiri sunt asemănătoare sau chiar identice cu cele ale materialului masiv. Există însă și deosebiri, de cele mai multe ori legate de proprietățile electrice (electroconductibilitate, mobilitatea purtătorilor de sarcină etc) sau pot apare caracteristici noi, ca de exemplu: noi forme structurale.

În ceea ce privește proprietățile optice, cercetări recente, au arătat că ele coincid cu cele ale materialului masiv, dacă structura cristalină se păstrează. Analiza straturilor subțiri oferă însă facilități sporite în domeniul spectrelor optice, în special de absorbție datorită controlului riguros al grosimii, care poate fi deosebit de mic (zeci de Å). Datorită acestui fapt, densitatea optică a probelor scade apreciabil, iar în spectrele optice apare clar, structura fină a benzilor de absorbție. S-a constatat experimental, că în anumite situații, studiul proprietăților optice și electrice ale materialelor este mult mai practic de efectuat pe straturi subțiri, decât pe materialul masiv.

Pe lângă interesul pur teoretic, pe care îl prezintă cunoașterea cu precizie a grosimii straturilor subțiri metalice, dielectrice și semiconductoare, din punct de vedere al producătorului de dispozitive electronice și circuite integrate, sunt relevante cel puțin încă două motivații:

- utilizarea materialelor sub formă de SS cu grosimea controlată riguros la construcția și realizarea unor dispozitive electronice sau circuite integrate de mare interes științific și economic.

- determinarea proprietăților fizice, chimice și structurale, a unor noi materiale sau compuși de materiale, de mare utilitate în microelectronică.

Rezultă așadar, că grosimea stratului constituie un parametru tehnologic și de proiectare, care determină numeroase caracteristici electrice și funcționale ale dispozitivelor semiconductoare și ale circuitelor integrate monolitice sau hibride.

Elaborarea unor noi metode și echipamente electronice, capabile să permită măsurarea și controlul cu precizie al grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt, constituie principala cale de dezvoltare în vederea obținerii de performanțe ridicate și pentru asigurarea reproductibilității rezultatelor. Pe această direcție, se înscrie prezenta teză de doctorat, care aduce contribuții originale, atât la elaborarea unei metode optime pentru măsurarea cu precizie a grosimii straturilor subțiri, cât și la conceperea unui echipament electronic automat pentru conducerea, comanda și controlul parametrilor de proces, în timp real.

Pe parcursul a șapte capitole sunt înfățișate:

- importanța și necesitatea măsurării și controlului grosimii SS depuse în instalații industriale de vid înalt
- principiile și metodele cunoscute pentru măsurarea și controlul grosimii SS depuse în instalații industriale de vid înalt
- o metodă optimală pentru măsurarea și controlul în timpul procesului tehnologic a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt
- construcția și funcționarea unui aparat electronic pentru măsurarea și controlul cu precizie a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic
- un echipament electronic automat pentru conducerea, comanda și controlul parametrilor de proces ai unei instalații industriale de obținere a SS prin depuneri succesive în vid înalt
- testarea echipamentelor realizate și prezentarea rezultatelor experimentale
- sistematizarea contribuțiilor originale și a concluziilor finale care se impun.

Prezenta lucrare, reprezintă corolarul activității de cercetare științifică desfășurată pe durata ultimilor zece ani de autor, în cadrul colectivului de Tehnologie electronică de la Facultatea de Electronică și Telecomunicații din cadrul Universității “Politehnica” din Timișoara.

Substanța tezei, ca și modalitățile de expunere, au avut mult de câștigat din discuțiile purtate cu Domnul Prof. Dr. Ing. Tiberiu Mureșan - conducătorul științific al lucrării - căruia îi exprim pe această cale, întreaga mea grațitudine.

Aduc, de asemenea, caldele mele mulțumiri aceluia care, cu sollicitudine și pricepere, au veghiat la definitivarea și tehnoredactarea lucrării.

AUTORUL

CAPITOLUL 1

IMPORTANȚA ȘI NECESITATEA MĂSURĂRII ȘI CONTROLULUI GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI DEPUSE ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT

Măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri (SS) de natură diferită, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt, prezintă o deosebită importanță, atât în studiul proprietăților fizico-structurale, cât și pentru diferite aplicații ale microelectronicii. În prezent, este binecunoscut că grosimea stratului depus reprezintă unul din parametrii importanți care determină multe din caracteristicile electrice ale circuitelor integrate și dispozitivelor semiconductoare. Pentru a sublinia importanța și necesitatea măsurării și controlului grosimii SS depuse în instalații industriale de vid înalt, în acest capitol vom prezenta principalele procedee tehnologice de obținere a SS, distribuția grosimii SS depuse pe substraturi, cerințele impuse metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii SS și vom încheia cu enumerarea principalelor aplicații ale metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii SS, utilizate curent în microelectronică.

1.1. PROCEDEE TEHNOLOGICE DE OBȚINERE A STRATURILOR SUBȚIRI

Dintre procedeele cunoscute de obținere a straturilor subțiri metalice, dielectrice și semiconductoare utilizate în microelectronică, am reținut spre exemplificare, evaporarea termică și pulverizarea catodică în vid înalt, datorită versatilității și gradului ridicat de aplicabilitate. Procesul de evaporare termică și condensarea moleculelor evaporate pe substrat are loc în incinta vidată a unei instalații de depunere, a cărei schemă simplificată este prezentată în figura 1.1. /10,30,34,65/.

Pentru realizarea evaporării termice se utilizează diferite procedee, ca de exemplu: încălzirea prin efect Joule cu ajutorul curentului electric a nacelelor în care s-a depozitat materialul ce urmează să fie evaporat, sau chiar a conductorilor

confeționați din materialul de evaporat, încălzirea prin curenți de înaltă frecvență, bombardamentul cu fascicul ionic sau electronic, arcul electric, fasciculul laser etc.

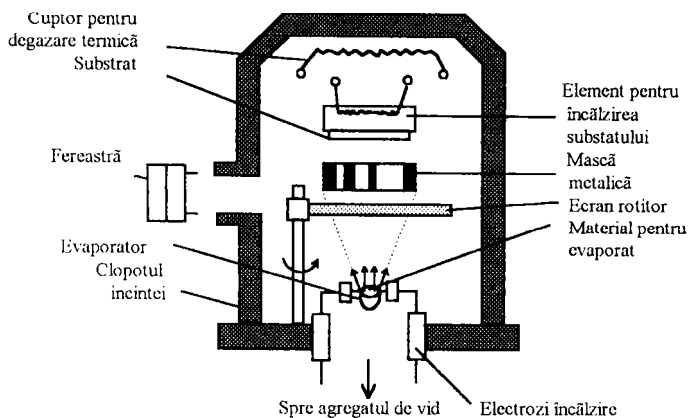


Fig.1.1. Schema simplificată a unei instalații pentru depunerea SS prin evaporare termică în vid înalt.

Structura cristalină, compoziția, aderența la substrat, proprietățile fizico-chimice și electrice ale stratului depus, depind nu numai de gradul de puritate al materialului care se evaporă, ci și de presiunea și compoziția gazelor aflate în incinta de evaporare. Pentru obținerea unui strat depus uniform cu compoziție apropiată de a materialului evaporat, este necesar să se realizeze în incinta de evaporare un vid înaintat de 10^{-6} - 10^{-10} torr. Pentru obținerea vidului necesar în incinta de evaporare se folosesc sisteme de pompare înseriate, care pot conține pompe mecanice cu ulei, ionice, turbomoleculare, criogenice, etc.

Instalația de evaporare este dotată de regulă cu unul sau mai multe evaporatoare, dispozitive de ecranare, cuptorul de încălzire a substraturilor și pentru degazare, dispozitive de măsurat grosimea stratului depus, termocuple pentru măsurarea temperaturii și joje pentru măsurarea vidului. Existența mai multor evaporatoare face posibilă depunerea succesivă în cadrul aceluiași proces tehnologic a straturilor subțiri de natură diferită sau a compușilor binari din componența substanțelor complexe. Evaporatoarele trebuie încălzite la temperaturi de 1000-2000°C pentru a furniza căldura necesară evaporării materialului care urmează să se depună. Ele trebuie să nu-și modifice structura fizică la aceste temperaturi, să nu se alieze și să nu reacționeze chimic cu materialul de evaporat, să susțină fizic greutatea acestuia și să aibă o presiune de vapori suficient de scăzută pentru a nu se evapora. Se consideră că pentru materialele care se depun în mod curent în microelectronică, evaporatoarele din wolfram, tantal, molibden sau grafit, satisfac pe deplin aceste cerințe [2,4,18,53,71].

Procesul de condensare a moleculelor evaporate pe substrat, depinde în principal de: distanța suport-evaporator, densitatea fluxului molecular, temperatura critică de condensare, presiunea vidului realizat, natura și gradul de prelucrare al substratului, temperatura și mobilitatea atomilor pe suprafața substratului, prezența câmpurilor electromagnetice perturbatoare, existența impurităților etc.

Trebuie remarcat că aderența la substrat, grosimea și uniformitatea straturilor depuse, structura cristalină ca și unele proprietăți fizico-chimice ale straturilor subțiri obținute prin evaporarea termică în vid, sunt puternic influențate de valoarea parametrilor enumerați anterior.

O altă metodă utilizată curent în microelectronică pentru obținerea straturilor subțiri o constituie pulverizarea catodică. Ea constă în bombardarea materialului care trebuie depus cu particule având energii mari, desprinderea atomilor de la suprafața acestuia și depunerea lor pe substrat. Metoda prezintă o serie de avantaje dintre care merită menționate:

- permite depunerea unor materiale refractare, dificil de obținut sub formă de straturi subțiri prin alte procedee;
- se poate aplica uci game largi de materiale, deci se pretează la depuneri multistrat;
- asigură grosimi uniforme prin utilizarea țintelor de grosimi mari;
- permite curățirea prealabilă a substraturilor prin bombardament ionic;
- asigură obținerea unor straturi subțiri metalice de mare puritate, împiedicând contaminarea cu oxigen a stratulului depus, prin aplicarea unei tensiuni negative pe substrat;
- realizarea pulverizării într-o atmosferă reactivă de oxigen sau azot, permite obținerea de oxizi sau nitruri, prin procedeul denumit “pulverizare catodică reactivă”.

Depunerile de straturi subțiri prin pulverizarea catodică se realizează în instalații similare celor utilizate pentru evaporarea termică, la care se adaptează anodul și catodul pulverizatorului, dispozitive de introducere a diverselor gaze și de măsurare a presiunii lor, sursa de înaltă tensiune (până la 10kV) etc.

O variantă îmbunătățită a procedurii de pulverizare catodică o constituie depunerea straturilor subțiri prin pulverizare în plasmă. Prin acest procedeu se obțin straturi depuse sub acțiunea ionilor pozitivi din plasma unei descărcări electrice în gaze inerte (argon). Schema de principiu a unei instalații de depunere prin pulverizarea catodică în plasmă este prezentată în figura 1.2. /8,30,91/.

Pentru realizarea depunerii, se amorsează o descărcare electrică între anod și catod, după care prin aplicarea unei tensiuni negative pe electrodul care conține materialul ce urmează să fie depus, începe procesul propriu-zis de pulverizare, prin bombardament cu ionii pozitivi de mare energie conținuți în plasmă. Atomii extrași din sursă în urma bombardamentului ionic, se vor deplasa mai ales pe direcția perpendiculară pe suprafața sursei, ajungând astfel pe suprafața substratului încălzit.

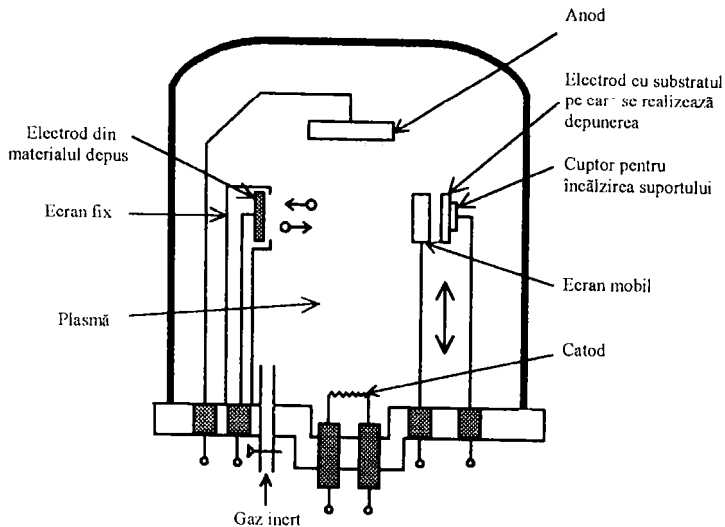


Fig. 1.2. Schema simplificată a unei instalații pentru depunerea SS prin pulverizare în plasmă.

Degazarea inițială a substratului asigură obținerea unei aderențe ridicate a stratului depus. Pentru depunerea materialelor cu conductibilitate scăzută (dielectrice, ferite, etc.) se utilizează pulverizarea în plasmă la înaltă frecvență. În vederea creșterii vitezei la depunere, unele instalații de pulverizare în plasmă au spațiul de descărcare dispus într-un câmp magnetic longitudinal. Viteza de condensare a moleculelor pe substrat poate fi așadar reglată prin modificarea puterii generatorului de înaltă frecvență, creșterea presiunii și a câmpului magnetic în incinta de lucru, sau prin scăderea temperaturii substratului.

Rezultă așadar, că atât pulverizarea catodică cât și evaporarea termică reprezintă procedee tehnologice bazate pe procese fizice, care solicită aplicarea unor metode specifice de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri depuse.

Depunerea electrolică, depunerea prin reducere chimică și depunerea chimică din faza gazoasă, determină formarea stratului din materialul mediului înconjurător, în timp ce anodizarea din faza gazoasă determină formarea stratului din materialul substratului.

Aceste procedee de depunere, bazate pe procese chimice, implică utilizarea altor principii și metode pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor formate, decât cele utilizate la procedeele tehnologice de obținere a straturilor subțiri prin depuneri în instalații industriale de vid înalt.

Din acest motiv în lucrare vom trata numai problemele legate de măsurarea și controlul în timpul procesului tehnologic a grosimii straturilor subțiri obținute prin pulverizare catodică sau evaporare termică în vid înalt.

1.2. DISTRIBUȚIA GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI DĒPUSE PE SUPORT PLAN

DistribuȚia grosimii straturilor subȚiri condensate pe substrat, depinde de forma și geometria sistemului de evaporare, de distanȚa evaporator-substrat, de condiȚiile energetice, de presiunea parȚială a gazelor din incintă etc. Considerând evaporatorul punctiform cu simetrie sferică și presiunea din incintă destul de scăzut pentru a neglija ciocnirile dintre atomii (moleculele) substanȚelor evaporate, se poate determina distribuȚia grosimii stratului depus pe un suport plan aplicând legile lui Lambert.

Dacă h este distanȚa evaporator-substrat și v este viteza de evaporare (figura 1.3.) grosimea d a stratului într-un punct oarecare P situat pe substrat este:

$$d = \frac{hv}{4\pi\rho(h^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1.1)$$

unde ρ este densitatea materialului evaporat.

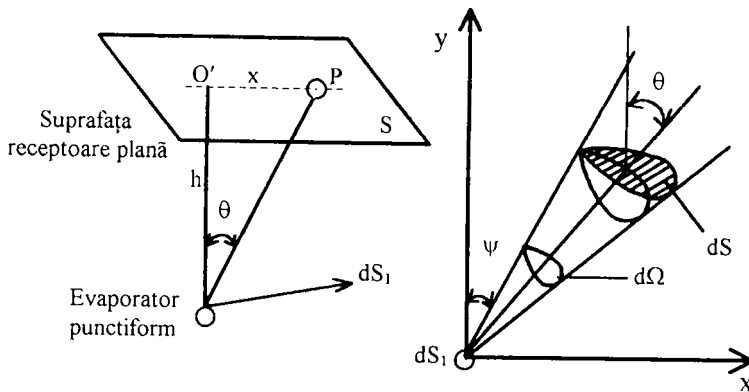


Fig. 1.3. Evaporarea dintr-un izvor punctiform dS_1 și condesarea pe o supraȚă receptoare plană S.

Grosimea d_0 într-un punct situat pe direcȚia normalei ($x=0$) va fi:

$$d_0 = \frac{v}{4\pi\rho} \frac{1}{h^2} \quad (1.2)$$

Din relaȚiile (1.1) și (1.2) rezultă expresia:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (1.3)$$

a cărei dependență de raportul $\frac{x}{h}$ este prezentată în figura 1.4. (curba 1).

Dacă se consideră evaporarea dintr-o sursă plană dispusă paralel cu suprafața receptoare, atunci grosimea stratului condensat în punctul P (figura 1.5.) va fi:

$$d = \frac{\nu}{\pi p} \frac{h^2}{(h^2 + x^2)^2} \quad (1.4)$$

iar dependența de distanța x a grosimii normalizate:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2\right]^2} \quad (1.5)$$

este reprezentată grafic în figura 1.4. (curba 2).

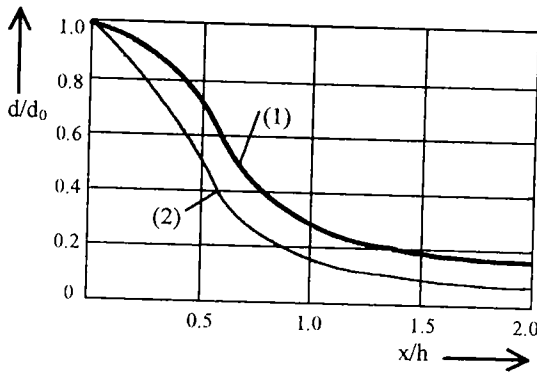


Fig.1.4. Dependența grosimii straturilor depuse pe o suprafață plană în funcție de distanța evaporator-substrat.

- (1) evaporatorul punctiform cu simetrie sferică
 (2) evaporatorul plan-paralel cu substratul.

Din cele prezentate mai sus rezultă dificultatea obținerii straturilor subțiri cu grosime uniformă în cazul folosirii evaporatoarelor punctiforme sau plane de suprafață mică. Din figura 1.4. se constată că în regiunea centrală se obțin grosimile cele mai

mari și grosimea stratului scade pe măsură ce crește distanța față de centrul evaporatorului. În cazul evaporatorului plan se produce o aplatizare mai lină a curbei pentru $\frac{x}{h} \in (0,5 + 1)$.

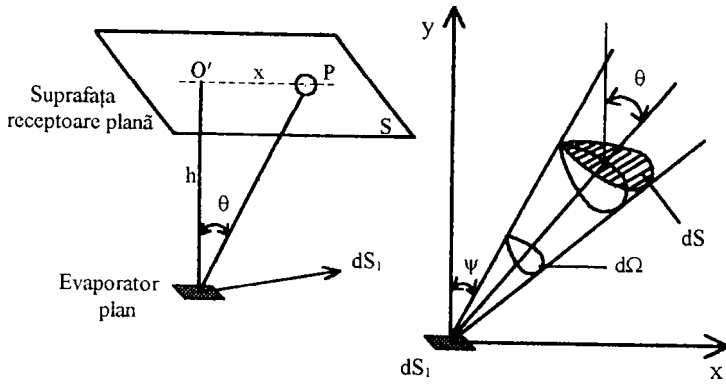


Fig. 1.5. Evaporarea dintr-un izvor de suprafață dS_1 și condensarea pe o suprafață receptoare plană paralelă cu S .

Întrucât în realitate, dimensiunile suportului nu sunt de obicei mai mari decât cele corespunzătoare raportului $\frac{x}{h} = 1$, rezultă că pentru substraturile cu suprafață mică este mai indicată utilizarea evaporatoarelor punctiforme.

Cele mai bune rezultate privind uniformitatea stratului depus se obțin utilizând evaporatoare circulare. În figura 1.6. se prezintă schema de dispunere a unui evaporator circular a cărui suprafață este paralelă cu suprafața substratului.

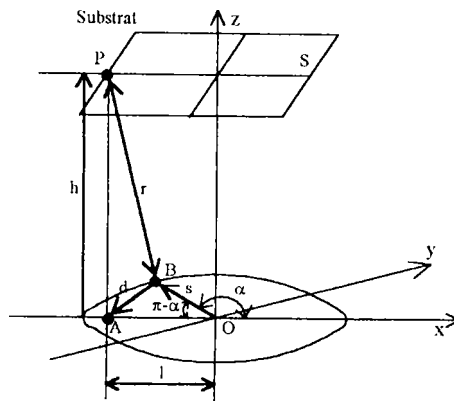


Fig. 1.6. Evaporarea dintr-o sursă circulară și condensarea pe o suprafață plană paralelă cu evaporatorul.

Pentru determinarea grosimii d a stratului depus într-un punct dat P al substratului, este necesar să se ia în considerare fiecare element de suprafață al evaporatorului.

Calculând contribuția tuturor evaporatoarelor elementare plane presupuse identice, se obține pentru grosimea d în punctul P expresia:

$$d = \frac{\nu h^2}{\pi \rho} \frac{h^2 + l^2 + s^2}{\left[(h^2 + l^2 + s^2)^2 - 4s^2 l^2 \right]^{1/2}} \quad (1.6)$$

Analog pentru grosimea d_0 a stratului subțire în regiunea centrală a substratului ($l=0$) rezultă:

$$d_0 = \frac{\nu h^2}{\pi \rho} \frac{1}{(h^2 + s^2)^2} \quad (1.7)$$

și ca urmare:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{(h^2 + l^2 + s^2)(h^2 + s^2)^2}{\left[(h^2 + l^2 + s^2)^2 - 4s^2 l^2 \right]^{1/2}} \quad (1.8)$$

În figura 1.7. s-a reprezentat grafic distribuția grosimii stratului subțire pe substratul plan, pentru $s=1$ și diferite valori ale lui h .

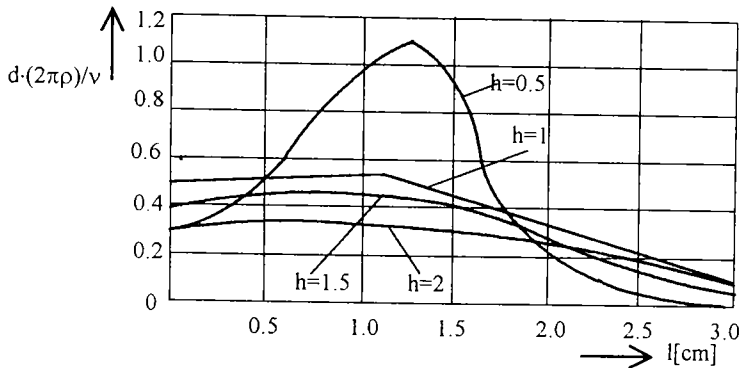


Fig.1.7. Dependența grosimii stratului depus pe un substrat plan paralel cu un evaporator circular unitar, funcție de distanța evaporator-substrat.

Din analiza graficelor prezentate în figura 1.7. se constată că există anumite regiuni ale suprafeței substratului pe care se obțin straturi subțiri uniforme ca grosime. O depunere uniformă a straturilor se asigură dacă $h \geq s$.

Se consideră, că mult mai uniforme sunt depunerile realizate dintr-un evaporator circular construit dintr-un număr oarecare de evaporatoare elementare punctiforme plasate paralel cu planul substratului, sau dintr-un evaporator care se rotește în jurul axei ce trece prin centrul suprafeței receptoare. În practică, pentru uniformizarea grosimii stratului depus, în locul rotirii evaporatorului se practică procedeul rotirii substratului în jurul evaporatorului.

După cum s-a arătat în paragraful 1.1. prin pulverizarea catodică se pot obține straturi subțiri cu grosime uniformă pentru suprafețe mult mai mari decât prin evaporarea termică în vid înalt. Acest fapt se datorează atât suprafeței mari pe care o au de obicei catodii-sursă cât și datorită prezenței curentului de pulverizare în toate regiunile spațiului de descărcare a coloanei de plasmă. În cazul pulverizării catodice trebuie luată în considerare distanța d dintre catod și substrat, precum și raportul dintre diametrul D al catodului și această distanță. Structuri absolut uniforme ca grosime se obțin numai pentru dimensiuni mari (practic infinite) ale catodului și suprafeței receptoare.

Pentru dimensiuni finite ale celor două suprafețe, grosimea stratului obținut la marginile substratului este mult mai mică decât grosimea stratului central așa cum se exemplifică în figura 1.8.:

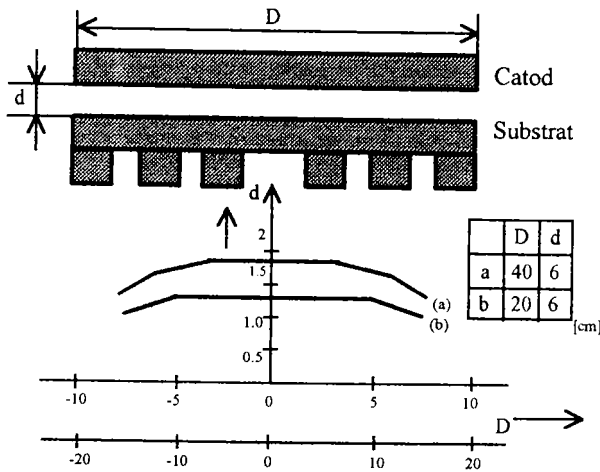


Fig. 1.8. Dependența uniformității stratului depus prin pulverizare catodică, de raportul D/d .

Această micșorare a grosimii stratului depus spre marginile substratului, pentru dimensiuni finite ale catodului, se poate explica prin difuzia atomilor pulverizați lateral față de suprafața receptoare, aceștia depunându-se pe pereții incintei.

1.3. CERINȚELE IMPUSE METODELOR ȘI ECHIPAMENTELOR DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI

Grosimea stratului subțire constituie un parametru geometric și fizic controlabil și măsurabil direct, fie în timpul depunerii stratului, fie după scoaterea probei din instalația industrială în care s-a obținut. Deși sunt cunoscute numeroase procedee și metode de măsurare a grosimii straturilor subțiri, trebuie menționat că nu toate sunt comode de aplicat în microelectronică, mai ales în producția de serie a dispozitivelor electronice realizate cu aceste straturi. Cerințele impuse metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii SS de natură diferită utilizate în microelectronică, sunt multiple și destul de severe pentru a putea fi satisfăcute în totalitate de către un singur procedeu sau dispozitiv. Principalele cerințe impuse metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt pot fi sistematizate astfel:

- 1) **Universalitatea metodei** - adică posibilitatea de aplicare a metodei de măsurare la oricare din procedeele tehnologice de depunere utilizate curent în microelectronică: evaporare termică, pulverizare catodică, epitaxie, bombardament cu ioni grei, etc. Această cerință este solicitată de realizarea dispozitivelor semiconductoare și a circuitelor integrate care implică utilizarea succesivă a unor materiale de natură diferită sub formă de SS, obținute prin oricare din procedeele enumerate.
- 2) **Flexibilitatea metodei** - adică posibilitatea măsurării în cadrul aceluiași proces tehnologic a grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv, indiferent de ordinea și numărul depunerilor. Această importanță cerință este dictată de necesitatea realizării elementelor de circuit și a interconexiunilor dintre ele, în structura circuitelor integrate hibride și a circuitelor multistratificate.
- 3) **Continuitatea și caracterul nedistructiv** al metodei de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri depuse succesiv în timpul procesului tehnologic, fără să afecteze calitatea straturilor depuse sau să influențeze procesul depunerii propriu-zise.
- 4) **Independența indicațiilor** de condițiile existente în instalația de depunere (presiune, temperatură, acțiuni sau deformații mecanice, vibrații, etc.) pentru a evita erorile de interacțiune sau erorile de influență și cumulara lor.

- 5) **Precizia ridicată** a măsurătorilor într-o gamă largă de valori, pentru a permite realizarea componentelor electronice și a circuitelor integrate la valorile specificate ale parametrilor de proiectare.
- 6) **Sensibilitatea constantă** a metodei la determinarea grosimii SS și a vitezei de evaporare, pentru principalele materiale metalice, dielectrice și semiconductoare utilizate curent în microelectronică.
- 7) **Versatilitatea metodei** - adică capacitatea procedurii de măsurare de a se preta la automatizarea instalației de depunere, pentru asigurarea controlului în timp real al parametrilor de proces (furnizând în același timp informațiile utile solicitate de unitatea centrală de comandă și control a procesului tehnologic).
- 8) **Fiabilitatea ridicată**, inerția scăzută și stabilitatea corespunzătoare în timp și cu temperatura.

Aceste cerințe principale impuse metodelor de măsurare și control a grosimii SS depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt sunt desigur specifice unei game largi de aplicații. Pe lângă cerințele prezentate mai sus, pot apare solicitări suplimentare dictate de natura și specificul unei aplicații concrete.

1.4. IMPORTANȚA ȘI NECESITATEA MĂSURĂRII CU PRECIZIE A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI ÎN MICROELECTRONICĂ

Cunoașterea și controlul cu precizie a grosimii straturilor subțiri, prezintă o deosebită importanță, atât pentru cercetările fundamentale legate de structura și comportarea materialelor metalice, dielectrice sau semiconductoare, cât și pentru asigurarea reproductibilității în producția de serie a dispozitivelor electronice și a circuitelor integrate. Trebuie remarcat că pentru materialele sub formă de SS drumul liber mijlociu devenind comparabil cu grosimea stratului, apar mecanisme suplimentare de împrăștiere a purtătorilor de sarcină pe suprafețele probei, fenomen cunoscut sub denumirea de "efect de dimensiune" /12,13,31,37,51/. Acest efect de dimensiune intervine atât în calculul mobilității purtătorilor de sarcină, a electroconductibilității sau fotoconductibilității straturilor cât și în calculul coeficienților termoelectricei, termomagnetici, galvanomagnetici, precum și în numeroase fenomene de transport, specifice funcționării dispozitivelor peliculare.

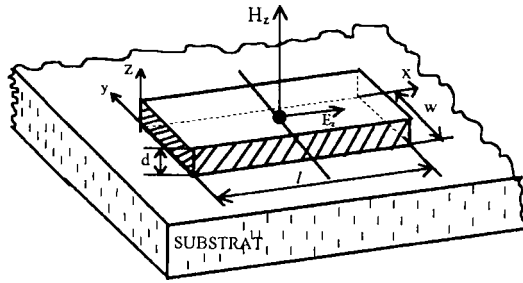


Fig. 1.9. Probă omogenă din SS depusă pe substrat izolator.

Considerăm o probă dintr-un material obținut sub formă de strat subțire, având dimensiunile geometrice prezentate în figura 1.9.

Dacă se notează cu: σ_0 conductibilitatea electrică a materialului masiv și cu l_m drumul liber mijlociu al purtătorilor de sarcină în proba considerată sub formă de SS, se obține [83] pentru conductibilitatea electrică a stratului subțire σ_s expresia:

$$\sigma_s = \frac{3}{4} \sigma_0 \cdot \frac{d}{l_m} \ln \frac{l_m}{d} \quad (1.9)$$

În figura 1.10. este reprezentată grafic dependența rezistivității electrice funcție de grosimea stratului atât pentru Ge (curba 1) cât și pentru Si (curba 2) obținute prin evaporare termică în vid înalt. Se observă că rezistivitatea straturilor subțiri este diferită de rezistivitatea materialului masiv și crește rapid o dată cu scăderea grosimii stratului.

O ușoară neconcordanță se observă la Ge pentru grosimi mai mari de $2 \cdot 10^{-6}$ m, când rezistivitatea crește ușor datorită transformărilor structurale ale cristalitelor.

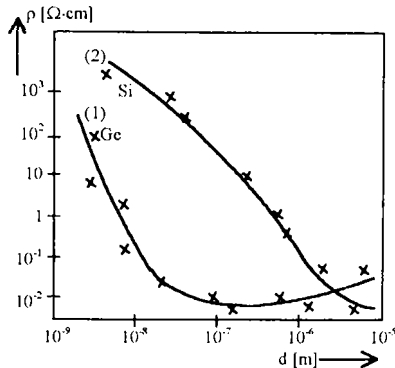


Fig. 1.10. Dependența rezistivității SS la Ge (curba 1) și Si (curba 2) de grosimea stratului depus.

De asemenea s-a constatat experimental /55/ că rezistivitatea straturilor subțiri obținute prin procedee de evaporare termică sau pulverizare catodică în vid înalt este dependentă și de viteza de condensare a moleculelor pe substrat /48,49/ așa cum se exemplifică în figura 1.11.:

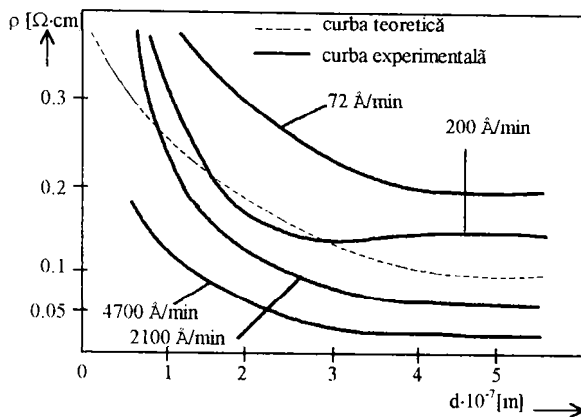


Fig.1.11. Dependența rezistivității SS de Ge funcție de viteza de condensare a moleculelor pe substrat.

Rezultă așadar, că rezistivitatea straturilor subțiri este diferită de rezistivitatea materialului masiv, dependentă explicit de grosimea stratului și de viteza de condensare a moleculelor pe substrat.

Fenomenele fizice care se produc în straturile subțiri în urma interacției dintre inducția câmpului magnetic aplicat din exterior și sarcinile electrice aflate în mișcare prin substanța considerată, se numesc efecte galvanomagnetice.

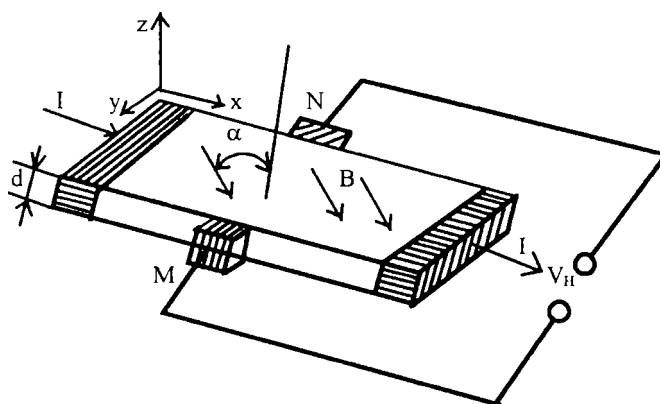


Fig.1.12. Schema dispozitivului Hall.

Unul din cele mai importante efecte galvanomagnetice îl constituie efectul Hall. La trecerea unui curent electric I printr-o plăcuță realizată sub formă de strat subțire (figura 1.12.), situată perpendicular (sau sub unghiul α) pe liniile inducției magnetice B , între fețele laterale MN apare o diferență de potențial V_H numită tensiune Hall /91/:

$$V_H = R_H \frac{IB}{d} \cos\alpha \quad (1.10)$$

unde cu R_H s-a notat constanta Hall.

Această relație arată că tensiunea Hall crește cu scăderea grosimii plăcuței traductor. Pentru straturile subțiri metalice sau semiconductoare, această scădere este limitată de “efectul de dimensiune” și îndeosebi de împrăștierea suplimentară a purtătorilor de sarcină pe fețele opuse ale stratului.

Fenomenele de împrăștiere conduc la micșorarea drumului liber mijlociu și implicit la micșorarea mobilității purtătorilor de sarcină, care intervine ca un factor de proporționalitate în expresia constantei Hall /83/.

Tot din categoria efectelor galvanomagnetice, face parte și efectul magnetorezistiv, care constă în modificarea rezistenței electrice a conductorilor sau semiconductoarelor, sub acțiunea câmpului magnetic aplicat /76/. El se caracterizează prin coeficientul magnetorezistiv M_R :

$$M_R = \frac{1}{B^2} \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (1.11)$$

unde B este inducția câmpului magnetic, ρ rezistivitatea traductorului în prezența câmpului magnetic, iar ρ_0 rezistivitatea în absența câmpului magnetic.

Pentru traductoarele realizate cu straturi subțiri, magnetorezistivitatea depinde de efectul de dimensiune și de grosimea peliculei prin intermediul rezistivităților ρ și ρ_0 .

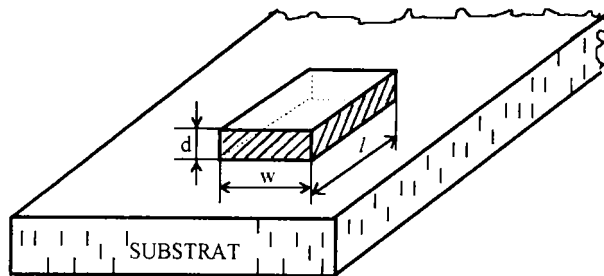


Fig.1.13. Configurație tipică de rezistor pelicular rectangular.

Dacă ne referim la tehnologia circuitelor integrate hibride, constatăm că rezistoarele peliculare (figura 1.13.) au rezistența nominală:

$$R_n = \frac{\rho}{d} \frac{l}{W} \quad (1.12)$$

dependentă explicit de grosimea peliculei rezistive.

De asemenea, condensatoarele peliculare (figura 1.14.) au capacitatea nominală:

$$C_n = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{l_c \cdot W_c}{d} \quad (1.13)$$

dependentă de grosimea peliculei dielectrice.

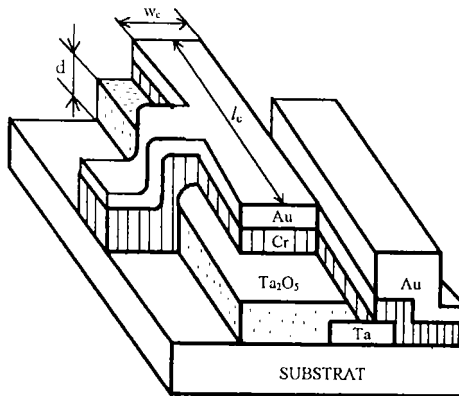


Fig. 1.14. Configurație tipică de condensator pelicular

În ambele cazuri toleranța nominală va fi dictată pe lângă precizia măștilor utilizate în procesele fotolitografice și de precizia cu care se măsoară și se controlează grosimea straturilor subțiri utilizate.

Trebuie menționate și traductoarele sau dispozitivele care funcționează pe baza efectelor termoelectrice (bazate pe efectul Peltier, Seebeck sau Thomson) sau pe baza efectelor termomagnetice (bazate pe efectul Ettinghausen, Nerst sau Righi-Leduc) și care au coeficienții de proporționalitate dependenți de grosimea stratului subțire din care se realizează dispozitivul [76]. În prezent o deosebită importanță se acordă utilizării SS la construcția memoriilor magnetice de mare capacitate și a dispozitivelor supraconductoare. Desigur șirul exemplurilor care relevă importanța și necesitatea măsurării și controlului grosimii straturilor subțiri utilizate în microelectronică, poate continua.

1.5. CONCLUZII

În acest capitol s-a încercat să se evidențieze importanța și necesitatea măsurării și controlului cu precizie a grosimii straturilor subțiri utilizate curent în aplicațiile microelectronicii. Au fost prezentate comparativ, procedeele convenționale industriale de obținere a straturilor subțiri prin evaporare termică sau prin pulverizare catodică în vid înalt. A rezultat că atât pulverizarea catodică, cât și evaporarea termică, sunt procedee tehnologice bazate pe procese fizice, care solicită aplicarea unor metode specifice de măsurare și control a grosimii SS depuse.

Studiul distribuției grosimii straturilor subțiri condensate pe substrat, a demonstrat că indiferent de procedeul tehnologic utilizat, în general se obțin straturi cu grosimea neuniformă, dependentă de forma și geometria evaporatorului, de distanța evaporator-substrat, de condițiile energetice dar și de presiunea parțială a gazelor reziduale din incinta vidată. Cele mai bune rezultate, privind uniformitatea stratului depus se obțin utilizând evaporatoare circulare, constituite dintr-un număr mare de evaporatoare elementare punctiforme, plasate paralel cu planul substratului. Au fost prezentate în sinteză, principalele cerințe impuse metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii SS utilizate în microelectronică. Se poate constata că aceste cerințe sunt multiple și destul de severe, pentru a putea fi satisfăcute în totalitate de către un singur procedeu sau dispozitiv. Pentru o aplicație concretă, pe lângă cerințele enumerate, pot apare desigur solicitări suplimentare.

În ultimul paragraf al capitolului, prin exemple de aplicații reprezentative, am încercat să pun în evidență importanța și necesitatea măsurării și controlului cu precizie a grosimii SS utilizate în microelectronică. Pe lângă interesul pur teoretic privind cercetările fundamentale legate de structura și comportarea materialelor sub formă de SS, cunoașterea și controlul cu precizie a grosimii SS devine deosebit de importantă pentru aplicațiile microelectronicii.

Ca parametru de proiectare, grosimea stratului intervine atât în calculul conductibilității electrice, a mobilității purtătorilor de sarcină sau fotoconductibilității straturilor, cât și în calculul coeficienților termoelectricei, termomagnetici, galvanomagnetici, precum și în numeroase fenomene de transport specifice funcționării dispozitivelor peliculare. Putem concluziona așadar că se impune măsurarea cu precizie și controlul grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în timpul procesului tehnologic pentru asigurarea reproductibilității rezultatelor și pentru obținerea dispozitivelor electronice și a circuitelor integrate la parametrii de proiectare specificați.

CAPITOLUL 2

PRINCIPII SI METODE DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI DEPUSE ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT

Măsurarea grosimii straturilor subțiri și controlul depunerii acestora presupune: controlul vitezei de evaporare, măsurarea vitezei de condensare a moleculelor pe substrat, controlul parametrilor de proces (presiune, temperatură, putere disponibilă etc.) și corelarea acestora cu principiul de măsurare a grosimii stratului depus. Dispozitivele și aparatele destinate măsurării straturilor subțiri și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat, sunt organizate în principiu după schema bloc generală de principiu prezentată în figura 2.1.

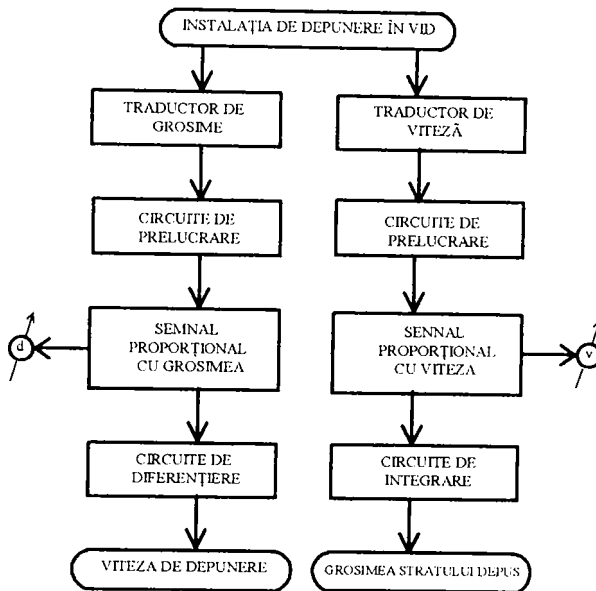


Fig.2.1. Schema bloc de principiu a unui dispozitiv pentru măsurarea grosimii SS și a vitezei de depunere

Se constată că grosimea stratului se poate obține prin integrarea semnalului proporțional cu viteza de depunere și reciproc, prin diferențierea semnalului proporțional cu grosimea stratului se poate determina viteza de depunere a moleculelor pe substrat.

În literatură [12,31,72,88,94] sunt cunoscute numeroase procedee de măsurare și control a grosimii probelor, dar nu toate sunt precise sau comode de aplicat în producția de serie a straturilor subțiri și a dispozitivelor realizate cu acestea. Figura 2.2. prezintă o reprezentare schematică a metodelor și dispozitivelor de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri, raportate în literatura de specialitate.

Acest capitol analizează principiile și metodele utilizate pentru determinarea grosimii straturilor subțiri și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat, precum și particularitățile acestor metode (avantaje, dezavantaje, domenii tipice de aplicații, etc.).

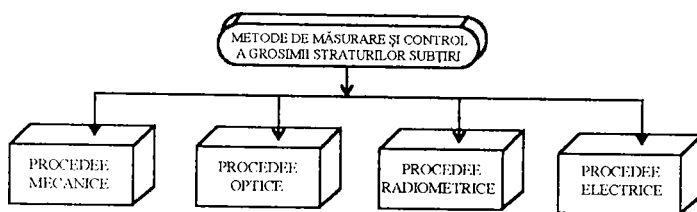


Fig.2.2. Reprezentarea schematică a procedeeleor de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri

2.1. METODELE DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI PRIN PROCEDEE MECANICE

Metodele de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri prin procedee mecanice pot fi clasificate convențional așa cum se prezintă în figura 2.3.

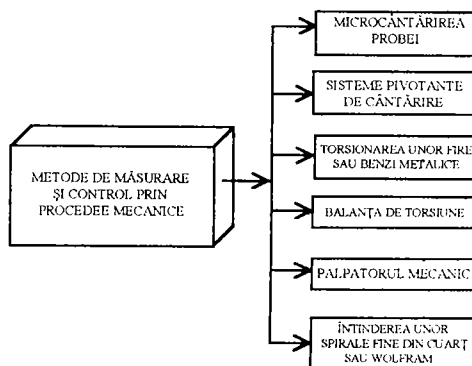


Fig.2.3. Clasificarea metodelor de măsurare și control a grosimii SS prin procedee mecanice.

Cea mai răspândită metodă mecanică de măsurare a grosimii stratului depus constă în microcântărirea probei. Această metodă urmărește cântărirea foarte precisă a suportului atât înainte cât și după depunere și cunoscând densitatea ρ a peliculei și suprafața S pe care se realizează depunerea, se poate determina imediat grosimea d a probei:

$$d = \frac{m}{S \cdot \rho} \quad (2.1)$$

Metoda permite determinarea masei cu precizie de până la fracțiuni de mg și poate servi la măsurarea grosimii chiar în timpul depunerii stratului, dacă substratul este montat pe unul din brațele balanței folosite.

Pentru a nu suprasolicita microbalanța se impune utilizarea unor suporturi ușoare a căror masă să nu depășească 100mg.

Trebuie remarcat că în majoritatea cazurilor densitatea stratului subțire diferă mult de densitatea materialului în stare masivă și ca urmare eroarea produsă la măsurare:

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta d}{d} 100 = \left(\frac{\Delta m}{m} - \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) 100 \quad (2.2)$$

face impracticabilă această metodă la măsurarea grosimilor foarte mici ($\text{Å} - n \cdot 10\text{Å}$) sau în cazul materialelor dielectrice care se obțin cu porozități ridicate.

Dacă se utilizează însă alte metode mai precise pentru determinarea grosimii stratului, atunci în urma microcântării probelor, se poate determina densitatea peliculei depuse. Acest procedeu s-a aplicat de exemplu pentru determinarea dependenței $\rho = \rho(d)$ la peliculele subțiri de Al, Ag, Au, Cr, Ni, Cu cu grosimi cuprinse între 200-3700Å, utilizate curent în microelectronică.

Un sistem mecanic interesant de control al vitezei de condensare a moleculelor pe substrat a fost elaborat de Nengebauer /85/ care a utilizat o microbalanță de torsiune pentru măsurarea momentului de rotație produs în urma bombardării unui cilindru ușor din folie de Al, de către fluxul de particule al substanței evaporate (figura 2.4.).

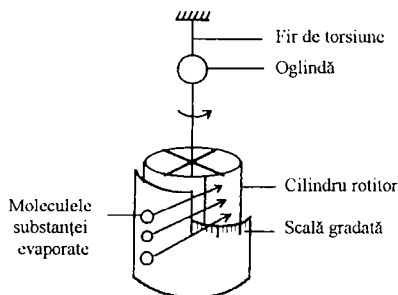


Fig.2.4. Schema mibrobalanței de torsiune.

Cilindrul, având diametrul de 5cm și o generatoare tot de 5cm, este suspendat de un punct fix prin intermediul unui fir subțire ($\Phi=25\mu\text{m}$) din wolfram. Prin lovirea tangențială a cilindrului de către fluxul de particule incident, unghiul de rotație va fi proporțional cu viteza de depunere.

Sensibilitatea acestei metode atinge $1,6\pm 0,2\text{\AA}/\text{min}$ pentru o rotație de 1° , microbalanța asigurând rezoluții de până la $0,1\text{mg}$ ceea ce corespunde la aproximativ 1\AA de argint depus pe o suprafață de 1cm^2 .

Măsurarea grosimii straturilor subțiri prin procedee mecanice, poate fi realizată și cu ajutorul unui palpator mecanic, prevăzut cu un ac de diamant. Vârful acului are forma unei piramide patrulatere sau a unui con circular, cu raza de curbură a vârfului cuprinsă între $0,7-1,3\text{mm}$. Acul palpatorului este riguros echilibrat, pentru ca forța aplicată acului să nu depășească 2mN , ceea ce corespunde unei presiuni aplicate pe suport de până la $5\cdot 10^7\text{N}/\text{m}^2$. Prin deplasarea sondei pe suprafața studiată, poziția momentană pe verticală a palpatorului este sesizată cu ajutorul unor dispozitive optoelectronice (figura 2.5.), sau a unor traductoare de poziție adecvate.

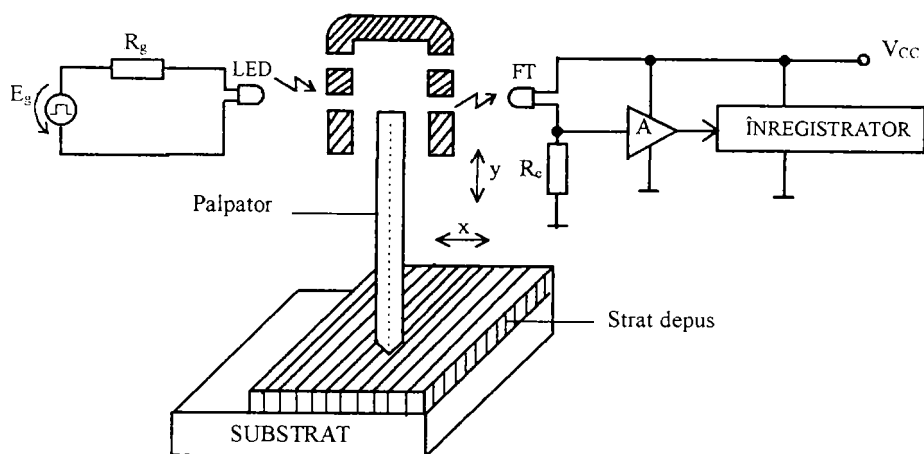


Fig.2.5. Schema de principiu a unui profilmetru.

Semnalul optic emis de LED, este trecut printr-un sistem mecanic de centrare și focalizare, captat de fototranzistorul F.T. și convertit în semnal electric. Acest semnal electric, amplificat de $10^5 - 10^6$ ori este aplicat unui înregistrator care reproduce exact profilul stratului subțire studiat. Din acest motiv dispozitivul prezentat se numește și profilmetru. Figura 2.6. prezintă profilul înregistrat de aparatul Talystep 1 /89/ la măsurarea grosimii straturilor subțiri de argint depuse pe un substrat de sticlă, la care regiunea din dreapta a fost protejată de o mască.

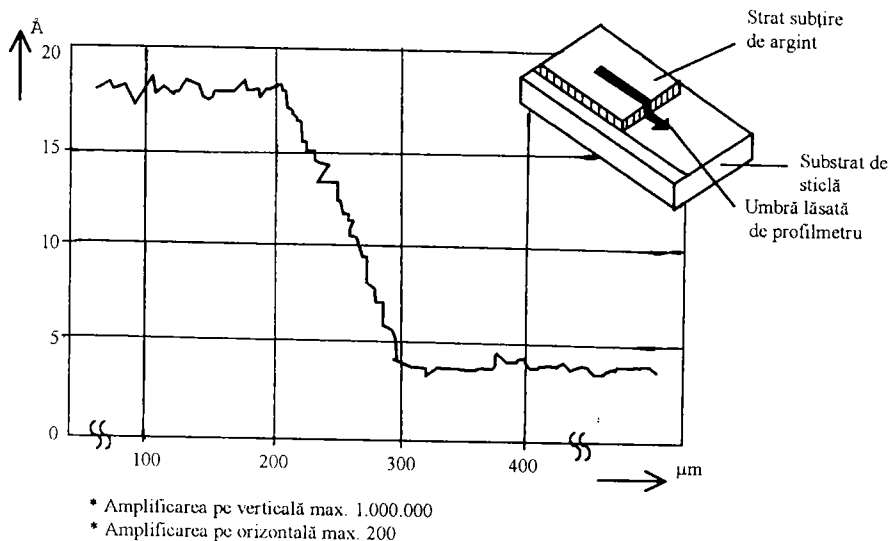


Fig. 2.6. Profil înregistrat cu aparatul Talystep 1.

Grosimea stratului de argint măsurat, corespunde distanței pe verticală între extrapolarea liniară a curbei și regiunea inferioară a graficului. Regiunea superioară indică neuniformitatea depunerii, iar regiunea inferioară conține informații privind gradul de prelucrare a substratului. Disponând de traductoare de poziție adecvate și de o gamă largă în care poate fi reglată amplificarea, profilmetrul Talystep 1 permite măsurarea grosimii straturilor cuprinse între 20\AA și $10\mu\text{m}$ cu o eroare de numai câteva procente.

Spre deosebire de metoda balanței, care furnizează valoarea globală a grosimii stratului depus, metoda profilmetrului, permite determinarea grosimii stratului în diferite regiuni ale substratului, deci se obține o hartă cu distribuția grosimii probei pe suprafața substratului.

2.2. METODE DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI PRIN PROCEDEE OPTICE

Principalele metode de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri prin procedee optice sunt prezentate sintetic în figura 2.7.

Se constată că măsurarea grosimii SS prin metode optice se poate realiza atât în timpul depunerii stratului cât și după scoaterea probelor din incinta vidată.

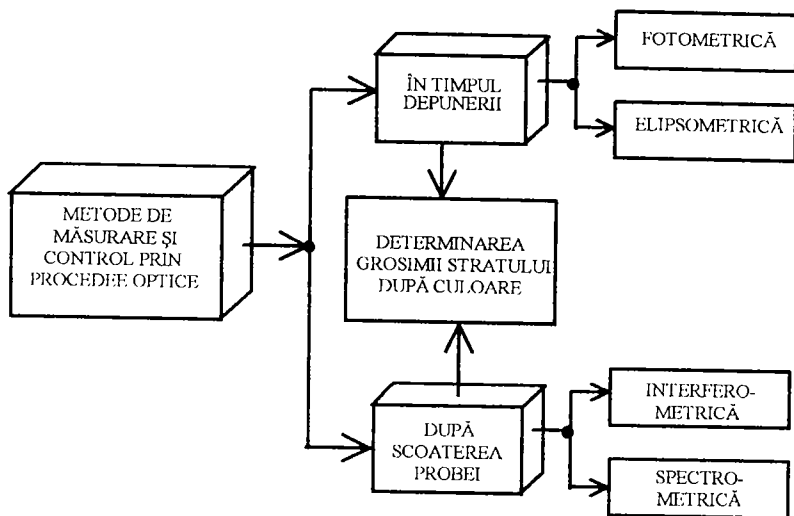


Fig.2.7. Clasificarea metodelor de măsurare și control a grosimii SS prin procedee optice.

Determinarea grosimii peliculelor după culoarea stratului se bazează pe interferența razelor de egală înclinare pe suprafața stratului depus. Dacă incidenta razei pe suprafața ce conține pelicula de analizat este apropiată de normală, atunci distanța dintre două maxime sau minime de interferență vecine este atât de mare, încât întreaga suprafață a peliculei se colorează într-o singură culoare /48/.

Metoda presupune o calibrare prealabilă și poate fi utilizată și pentru cazul depunerii în vid a materialelor de natură diferită, urmărindu-se schimbarea culorii unei plachete de control plasată lângă proba studiată. Aprecierea culorii fiind desigur subiectivă, metoda prezentată se folosește în situațiile în care precizia determinării grosimii nu este elementul principal. Spre exemplu, pentru bioxidul de siliciu crescut pe substrat de siliciu, un operator uman bine antrenat apreciază după culoare, grosimi cuprinse între 500Å și 15000Å cu o eroare absolută de $\pm 100\text{Å}$.

Trebuie remarcat că indicele de refracție al stratului poate influența culoarea în următoarele trei moduri:

- Intensitatea culorii poate fi afectată prin modificarea intensității unde reflectate pe suprafața de separație strat-substrat, datorită indicelui de refracție n al stratului transparent.
- La unghiuri de incidență normală a razei de lumină se pot obține culori similare pentru straturi diferite având indici de refracție diferiți. Un exemplu în acest sens îl constituie compararea culorilor obținute pentru peliculele de Ta_2O_5 și SiO_2 depuse la grosimi diferite. Explicația constă în modificarea

fazei, care are o valoare mai mare la straturile subțiri crescute pe tantal, decât la straturile crescute pe siliciu.

- c. Indicele de refracție al stratului, influențează modificarea culorii, cu valoarea unghiului de incidență a razei de lumină.

Cu toate aceste inconveniente, metoda se aplică curent în microelectronică la aprecierea grosimii straturilor dielectrice utilizate la pasivizări sau izolări (SiO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 , Ta_2O_5 , etc.). Pentru aceste materiale s-a elaborat un cod al culorilor, folosind măsurători comparative cu alte procedee mai precise.

Metoda fotometrică este cea mai utilizată metodă optică, pentru determinarea grosimii stratului depus în timpul formării sale, datorită simplității și accesibilității ei. Această metodă bazată pe măsurarea intensității luminii transmise, se aplică însă cu bune rezultate numai la determinarea grosimii straturilor subțiri transparente, depuse pe substraturi transparente. Pentru straturile subțiri opace (sau substraturi opace) se poate utiliza măsurarea intensității luminii reflectate, dar măsurările nu sunt suficient de precise, dacă nu se poate obține reflexia totală, pe suprafața de separație substrat-peliculă depusă. Fie d grosimea stratului depus, λ lungimea de undă a luminii de excitație, n și n_s indicii de refracție în strat și substrat (figura 2.8.).

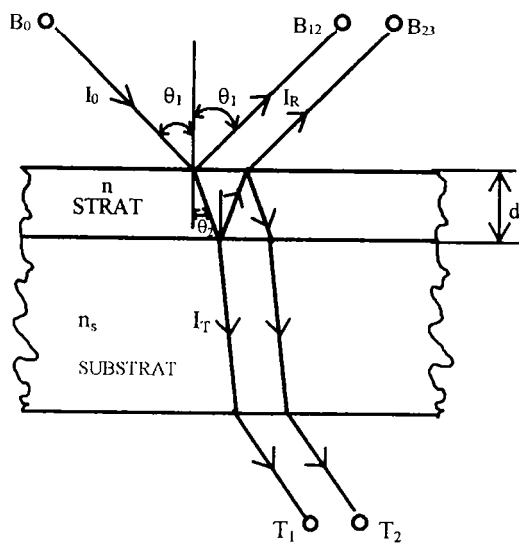


Fig.2.8. Principiul metodei fotometrice pentru determinarea grosimii straturilor subțiri.

Atunci între intensitatea I_T a luminii transmise și intensitatea I_0 a luminii incidente, există relația /72/:

$$I_T = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{4\pi k}{\lambda} d\right) \quad (2.3)$$

unde k reprezintă indicele de extincție definit prin raportul :

$$k = \frac{K \cdot \lambda}{4\pi} \quad (2.4)$$

K fiind coeficientul de absorbție al substratului.

Pentru determinarea grosimii stratului subțiri prin acest procedeu, se utilizează efectul de interferență care apare la limita de separație a sistemului strat-suport. Dacă indicele de refracție a materialului depus n , diferă de cel al substratului n_s , atunci în urma iluminării sistemului strat-substrat cu lumină monocromatică, se constată că intensitatea luminii reflectate se micșorează, atingând un minim, atunci când grosimea stratului devine egală cu $\lambda/4$. Fenomenul se datorează extincției prin interferență a luminii reflectate pe suprafața liberă a stratului și pe suprafața de separație strat-substrat. Mărind grosimea stratului depus, se obține un maxim, datorită reflexiei pe suprafața liberă a stratului, până când grosimea atinge $\lambda/2$, apoi din nou un minim pentru $d=3 \cdot \lambda/4$ și așa mai departe. Ca urmare, condiția matematică pentru obținerea unui extrem poate fi exprimată prin:

$$N \cdot \lambda = 2n_s \cdot d \cdot \cos\theta_2 = 2d(n_s^2 - \sin^2\theta_1) \quad (2.5)$$

unde N reprezintă ordinul maximului sau minimului de interferență.

Diferența de drum optic dintre două unde succesive, poate fi exprimată prin faza β dată în radiani:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2n_s \cdot S \cdot \cos\theta_2 = 2N \quad (2.6)$$

Se obține astfel pentru grosimea stratului subțire, expresia:

$$d = 2 \frac{N}{n_s^2 - \sin^2\theta_1} \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (2.7)$$

Se constată, că precizia obținută la determinarea grosimii stratului, este dependentă de precizia cu care se controlează unghiul de incidență al radiației monocromatice, de precizia cu care se determină unghiul de refracție al substratului și de precizia cu care se menține constantă lungimea de undă a radiației emise.

Pentru determinarea grosimii stratului subțiri cu această metodă, s-au elaborat aparate speciale numite fotometre. Metoda prezentată, este utilizată curent în industrie, la obținerea filtrelor din pelicule dielectrice, alcătuite din straturi suprapuse

și la determinarea grosimii peliculelor utilizate în sistemele de afișare alfanumerică a informației cu cristale lichide. Aceste dispozitive solicită de obicei grosimi ale straturilor subțiri egale cu un număr dat de $\lambda/4$ ceea ce corespunde desigur unui anumit număr de pelicule suprapuse cu grosimi controlate riguros prin metoda fotometrică prezentată.

Metoda elipsometrică /65,89,100,102/ este o metodă relativ nouă, pentru determinarea grosimii straturilor subțiri, bazată pe modificarea stării de polarizare a luminii reflectată de substrat. Starea de polarizare, este determinată de amplitudinea componentelor paralelă (ρ_p) și perpendiculară (ρ_s) a radiației și de diferența de fază dintre cele două componente $\Delta_p - \Delta_s$. La reflexia radiației pe o suprafață plană, raportul celor două amplitudini ρ_p/ρ_s și diferența de fază dintre cele două componente $\Delta_p - \Delta_s$, suferă modificări, care sunt dependente de constantele optice ale substratului n_s, R_s , de unghiul de incidență a radiației θ , de constantele optice ale peliculei n, R și de grosimea d a stratului depus. Dacă constantele optice ale substratului sunt cunoscute și dacă pelicula este neabsorbantă ($K=0$), atunci necunoscute în ecuațiile care descriu starea de polarizare sunt numai indicele de refracție n și grosimea peliculei depuse d . Determinând indicele de refracție al stratului printr-un alt procedeu se obține pentru grosimea stratului expresia /89/:

$$d = \frac{(180N + \beta) \cdot \lambda}{360(n^2 - \sin^2\theta)} \quad (2.8)$$

unde λ este lungimea de undă a radiației, θ este unghiul de incidență, β este faza radiației reflectate, iar N este valoarea întregă a ordinului de interferență.

Schema de principiu a unui elipsometru pentru măsurarea grosimii straturilor subțiri este prezentată în figura 2.9. Instalația conține o sursă de lumină monocromatică, care este dirijată printr-un colimator, polarizată liniar de un polarizator, după care este polarizată eliptic de un compensator.

După reflexia pe proba de măsură, lumina polarizată este trecută printr-un analizor care efectuează raportul componentelor polarizării, detectată de un fotomultiplicator și înregistrată. Din reprezentarea grafică a dependenței diferenței de fază $\Delta = \Delta_p - \Delta_s$ de raportul componentelor polarizării:

$$\psi = \text{arctg} \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (2.9)$$

se poate deduce atât grosimea stratului depus cât și valoarea indicelui său de refracție. Pentru exemplificare, în figura 2.10. se prezintă imaginile înregistrate de un elipsometru, la măsurarea unor straturi subțiri transparente, având indici de refracție diferiți, depeși pe un substrat de siliciu.

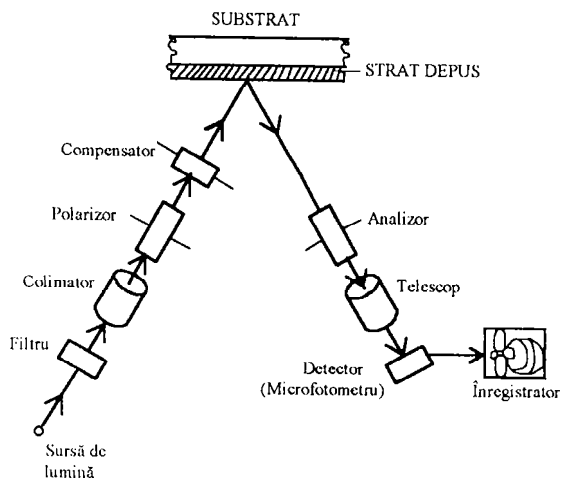


Fig.2.9. Schema de principiu a unui elipsometru.

S-a utilizat lumina monocromatică cu $\lambda=5,461\text{\AA}$, emisă sub unghiul $\theta=70^\circ$ iar siliciul prezintă caracteristicile optice: $n_s=4,05$ și $k=0,028$. Din grafic se citesc valorile lui n și β care cresc din 20° în 20° , după care înlocuind în relația (2.8) se obține grosimea stratului depus.

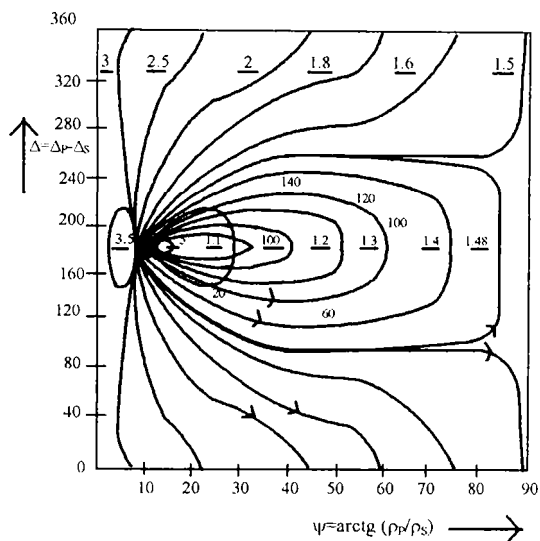


Fig.2.10. Imagini elipsometrice obținute pentru diferite materiale cu grosimi diferite depuse pe un substrat de siliciu.

Se constată că deși elipsometria este o metodă comodă pentru determinarea grosimii straturilor subțiri, precizia măsurătorilor este necorespunzătoare mai ales pentru materialele cu indici scăzuți de refracție.

Metoda interferometrică se aplică pentru măsurarea grosimii straturilor subțiri, după ce acestea au fost scoase din incinta vidată în care au fost obținute. Schema bloc de principiu a instalației pentru măsurarea grosimii SS prin metoda interferometrică este prezentată în figura 2.11.

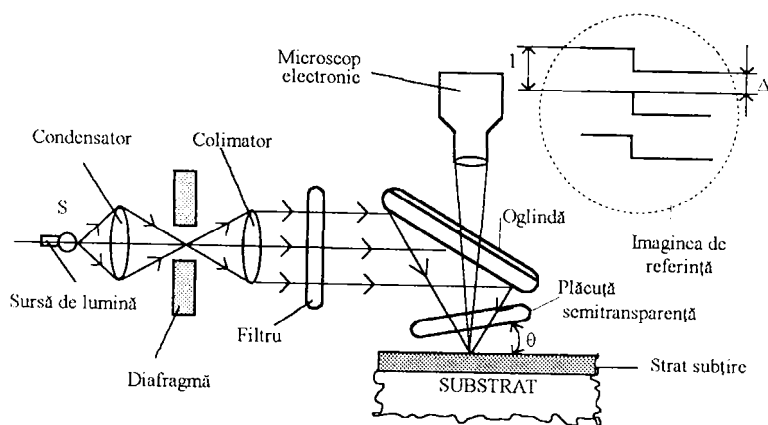


Fig.2.11. Schema instalației pentru măsurarea grosimii straturilor subțiri utilizând metoda interferometrică.

De la sursa S lumina trece prin condensator, diafragmă, colimator și filtru, căzând pe oglinda și plăcuța semitransparentă. O parte din lumină se reflectă și este aplicată sistemului format din substratul peste care s-a depus stratul a cărui grosime urmează a fi determinat, prin intermediul unei plăcuțe semitransparente și reflectoare care formează unghiul θ cu planul substratului. Liniile de interferență observate cu microscopul electronic reprezintă contururile domeniilor de egală grosime, corespunzătoare suprafeței de separație strat-substrat. Pentru măsurări de precizie se dorește ca unghiul θ al pernei de aer care se formează între stratul subțire și suprafața plăcii reflectante să fie cât mai mic, deoarece liniile de interferență care se formează satisfac relația:

$$\lambda n_i = 2n_r \cdot d \cdot \cos\theta \quad (2.10)$$

unde : n_r reprezintă indicele de refracție al plăcuței semitransparente, d grosimea stratului măsurat, iar n_i ordinul de interferență.

Pentru cazul particular $\theta=0$, $n_r=1$ rezultă $d = \frac{\lambda}{2}$ adică inelele de interferență apar pentru fiecare variație cu $\frac{\lambda}{2}$ a grosimii stratului, de unde și denumirea de benzi de interferență de egală grosime.

Dacă Δl reprezintă deplasarea franjelor de interferență, atunci grosimea d a stratului depus va fi dată de relația /48/:

$$d = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.11)$$

l reprezentând distanța măsurată între două imagini de interferență învecinate. Precizia metodei crește dacă pe o porțiune din suprafața substratului acoperit cu stratul subțire a cărei grosime urmează a se determina, se depune o peliculă puternic reflectantă din Al sau Ag.

În practică, pentru a obține un prag abrupt al imaginii de interferență, se zgârie cu un ac fin stratul subțire, formând un canal în care se formează imaginea de interferență (figura 2.12.).

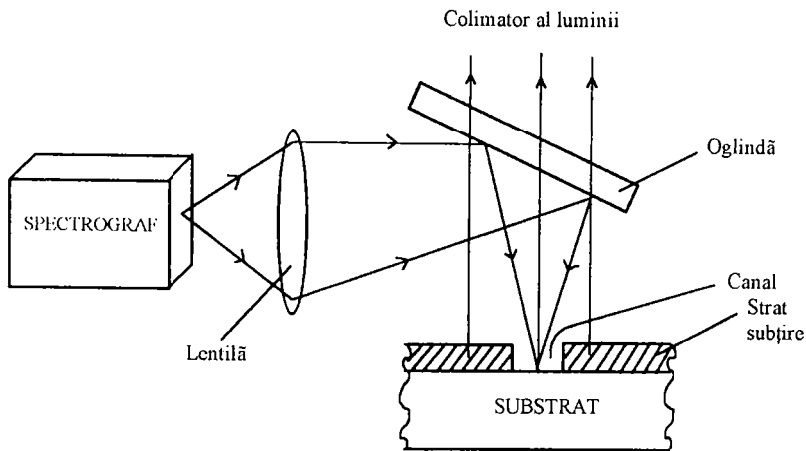


Fig.2.12. Practicarea unui canal în SS pentru formarea unei imagini de interferență cu prag abrupt.

Majoritatea interferometrelor actuale folosite la măsurarea grosimii straturilor subțiri, utilizează interferometria cu fascicule multiple. Schema de principiu a unui sistem ce utilizează interferența cu fascicule multiple, între două suprafețe plan-paralele de sticlă pe care s-au depus straturi subțiri de argint, este prezentată în figura 2.13.

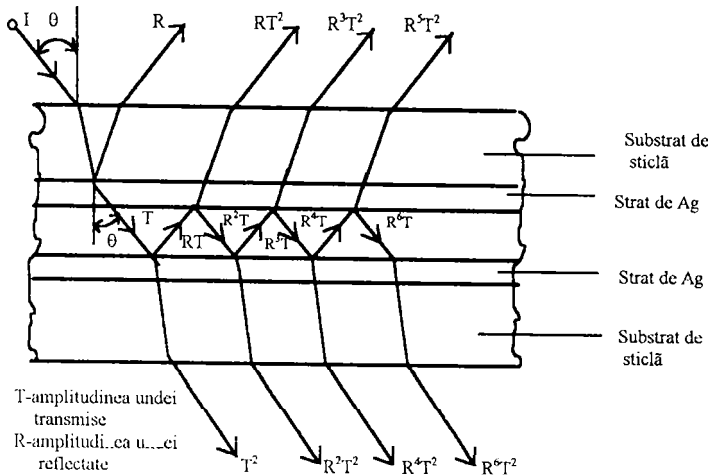


Fig.2.13. Schema de realizare a interferometriei cu fascicule multiple.

Condiția esențială pentru realizarea interferenței cu fascicule multiple o constituie absorbția scăzută a stratului subțire de argint prin care trebuie transmisă lumina. Pe acest principiu s-au construit interferometre industriale (Fizeau, Mickelson) care permit măsurători ale grosimii SS în domeniul 30-20000Å cu o precizie absolută $\pm 10\text{Å}$.

2.3. METODE DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI PRIN PROCEDEE RADIOMETRICE

Procedeele radiometrice de determinare a grosimii straturilor subțiri, deși rapide și precise, se utilizează rar în microelectronică și numai după ce probele au fost scoase din incinta vidată. Principiul metodei pornește de la constatarea că reflexia razelor infraroșii cu o anumită lungime de undă are loc nu numai la suprafața stratului subțire de măsurat ci și la interfața strat-substrat. Schema de principiu a metodei este prezentată în figura 2.14.

Se constată că unda generată de emițătorul E se reflectă atât la suprafața stratului cât și la suprafața de separație strat-substrat, diferența de drum a razelor reflectate fiind:

$$\delta = n_s(AB + DC) - AD = 2 \cdot d \cdot n_s \cdot \cos\varphi' \quad (2.12)$$

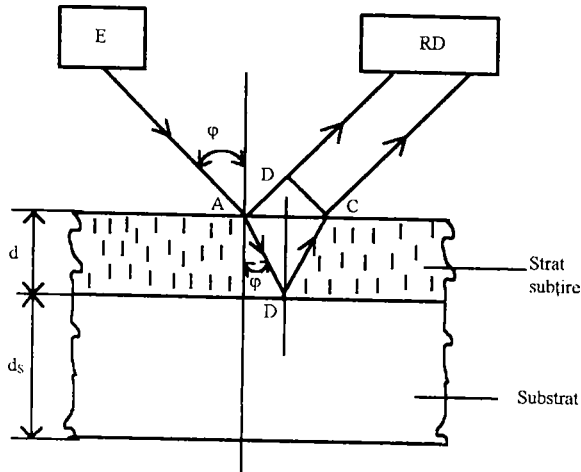


Fig.2.14. Schema de principiu a metodei de măsurarea grosimii SS prin procedee radiometrice.

Cunoscând indicele de refracție al stratului n_s , calculând unghiul de refracție φ' și măsurând cu detectorul de radiații RD diferența de drum optic δ cu relația de mai sus, se poate determina grosimea stratului subțire:

$$d = \frac{\delta}{2 \cdot n_s \cdot \cos \varphi'} \quad (2.13)$$

Această metodă este rapidă, precisă și nedistructivă dar se poate aplica numai la determinarea grosimii straturilor subțiri dielectrice cu conductibilitate electrică foarte scăzută.

O variantă modernă a acestei metode, constă în activarea radioactivă a substratului și măsurarea absorbției radiației pentru diferite grosimi ale stratului subțire depus pe substrat. În măsurătorile de grosimi prin procedeele iradierii stratului cu o sursă radioactivă și măsurarea atenuării radiației, se utilizează cel mai frecvent absorbția sau împrăștierea radiațiilor X și a radiațiilor α sau β .

Principalele aplicații ale tehnicii radioactive de măsurare a grosimii peliculelor funcție de absorbția radiațiilor X în stratul depus sunt prezentate în Tabelul 2.1.

Această tehnică de măsurare a intensității radiațiilor X absorbite în stratul a cărui grosime se măsoară, este influențată de proprietățile structurale ale peliculei cum ar fi: dimensiunile moleculelor, agitația termică sau axele de orientare cristalină. Este utilizată în aplicațiile industriale care solicită măsurarea grosimilor cuprinse între 0,1-10mm, unde asigură precizii relative mai bune de $\pm 5\%$.

Tabelul 2.1. Exemple de aplicare a tehnicii radioactive la măsurarea grosimii SS bazată pe principiul absorbției.

TEHNICA	STRAT SUBȚIRE		SUBSTRAT
	MATERIAL	GROSIME	
BEEGHLY	TRIDIU	0.1016mm	ZIRCONIU
ZEMANY și LIEBHALS	STANIU	0.0762mm	PLUMB
ACHEY și SERGFASS	ARGINT	0.127mm	INDIU
LAMBERT	ALUMINIU	0.0508mm	ARGINT
LOWE și OGILVIE	CROM	0.0254mm	OȚEL

O altă tehnică radioactivă, excită materialul stratului cu o sursă de radiații X sau cu un fascicul de electroni și măsoară intensitatea radiațiilor emise de strat, care este direct proporțională cu grosimea stratului. Această tehnică are un domeniu mai larg de aplicabilitate, deoarece singura condiție care se impune, este ca substratul să nu conțină elementele constituente ale stratului. În tabelul 2.2, sunt sintetizate, câteva aplicații ale tehnicii radioactive de măsurare a grosimii peliculelor, funcție de emisia radiațiilor X din stratul depus.

Metoda prezentată, permite măsurarea grosimii straturilor în domeniul 200Å-10000Å, depuse pe suprafețe cuprinse între 0,2-5cm², asigurând precizii relative mai bune de ±2%.

Tabelul 2.2. Exemplu de aplicare a tehnicii radioactive la măsurarea grosimii SS, bazată pe principiul emisiei.

TEHNICA	STRAT SUBȚIRE		SUBSTRAT
	MATERIAL	GROSIME	
KITH și DAUGHERTY	Fe,Ni,Cr	50.8·10 ⁻⁴ mm	Al
LIEBNAFSKY	Cr	127·10 ⁻⁴ mm	Mo
BIRKS	Ni	25.4·10 ⁻⁴ mm	Cu
ZANIN și SZULE	Ag	50.8·10 ⁻⁵ mm	Cu
KEESUET	Cr	25.4·10 ⁻⁵ mm	Ni

Grosimea straturilor subțiri, se poate măsura și prin bombardarea peliculei cu particule beta, emise de o sursă radioactivă. Intensitatea bombardamentului cu particule, depinde de grosimea stratului și crește cu numărul atomic al materialului care trebuie să aibă o structură diferită de substrat. Alegând surse radioactive

potrivite, se pot măsura, cu precizii relative de până la $\pm 5\%$, grosimi ale SS cuprinse între 0,01-5mm, depuse pe arii de până la 1cm^2 .

Pentru determinarea cu precizie, utilizând metode radiometrice, a grosimilor mai mici decât 100Å , se recomandă utilizarea difracției razelor X, fluorescența radiațiilor X sau chiar fluorescența straturilor de măsurat. Aceste metode, sunt însă limitate la determinarea numai a grosimii straturilor de mare conductibilitate electrică, sau a depunerilor succesive, de straturi suprapuse cu rapoarte ridicate ale conductibilității.

2.4. METODE DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI PRIN PROCEDEE ELECTRICE

Metodele electrice de măsurare a grosimii straturilor subțiri, au fost elaborate în scopul controlului grosimii și vitezei de evaporare în timpul procesului tehnologic. Variante ale acestor procedee pot fi însă folosite pentru determinarea grosimii SS după ce probele au fost scoase din incinta vidată. Convențional, metodele electrice pentru determinarea grosimii straturilor subțiri, pot fi clasificate, așa cum se prezintă în figura 2.15.

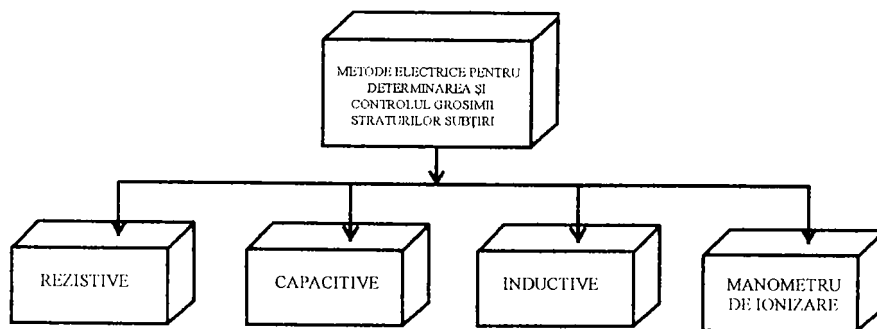


Fig.2.15. Clasificarea metodelor electrice pentru determinarea și controlul grosimii SS.

Una din cele mai răspândite metode electrice de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri, se bazează pe dependența rezistenței electrice R , de grosimea stratului depus d și de lungimea drumului mediu al purtătorilor în strat.

Această ultimă precizare este deosebit de importantă, întrucât acest parametru, determină mobilitatea purtătorilor de sarcină și implicit rezistivitatea straturilor depuse.

Dependența rezistenței electrice R , de natura (ρ), grosimea (d) a stratului depus și de dimensiunile geometrice (l, W) a probei rectangulare:

$$R = \frac{\rho}{d} \cdot \frac{1}{W} \quad (2.14)$$

este reprezentată grafic în figura 2.16.

Se constată că rezistența electrică a straturilor subțiri scade, o dată cu creșterea grosimii stratului, această dependență prezentând caracteristici specifice fiecărui material.

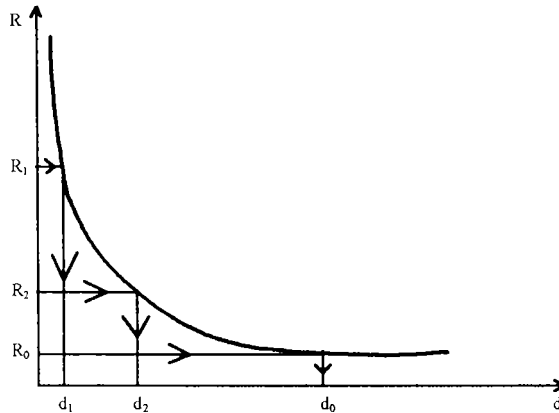


Fig.2.16. Dependența rezistenței electrice a probei de grosimea stratului.

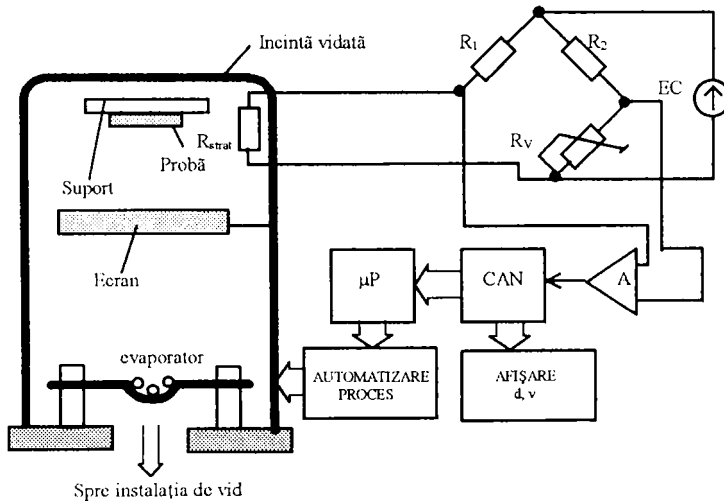


Fig.2.17. Schema simplificată a unei instalații de măsurare și control a grosimii SS bazată pe metoda rezistivă

În figura 2.17. se prezintă schema bloc de principiu a unei instalații pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri în timpul procesului tehnologic, bazată pe măsurarea rezistenței stratului depus.

Într-unul din brațele unei punți de măsurare în conexiune cvadripolară se conectează rezistența electrică a stratului a cărei grosime urmează a se determina. Semnalul electric obținut la ieșirea punții, amplificat și convertit numeric se aplică unui sistem numeric de calcul cu μP unde se sintetizează relația de dependență a rezistenței electrice de grosimea stratului depus. Sistemul numeric de prescriere și calcul, furnizează semnalele necesare activării blocului de automatizare a depunerii, care reglează curentul de încălzire al electrozilor, acționează ecranul obturator, sau comandă schimbarea tipului depunerii. Sistemul prezentat, permite, măsurarea și controlul rezistenței straturilor subțiri metalice sau semiconductoare cu o conductibilitate ridicată, fiind recomandată pentru măsurări de rezistență în domeniul $R=10-10^3\Omega$. Aceste limite pot fi însă extinse prin modificarea adecvată a schemei de măsurare a rezistenței electrice (pentru valori foarte mari sau foarte mici).

Deși simplă, metoda prezentată asigură precizii scăzute la măsurare, cunoscut fiind faptul că în funcție de abaterea de la compoziția stoechiometrică, rezistivitatea stratului subțire variază în unele cazuri cu 5-6 ordine de mărime, față de rezistivitatea materialului masiv (figura 2.18.).

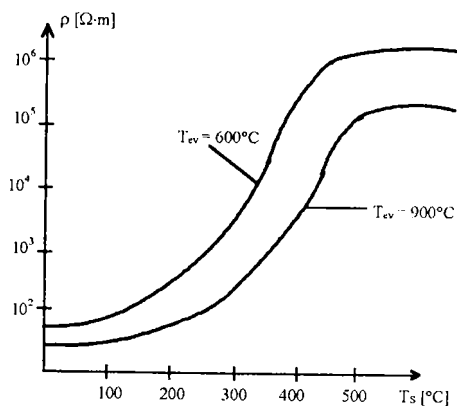


Fig.2.18. Dependența rezistivității straturilor subțiri de condițiile efective de obținere.

În practică, rezistivitatea ρ a materialelor sub formă de straturi subțiri, se determină cu metoda celor patru sonde (figura 2.19.).

$$\rho = \frac{\pi U}{I} \ln \frac{a-b}{a+b} \quad (2.15)$$

unde dimensiunile a și b sunt specificate în Fig.2.19.

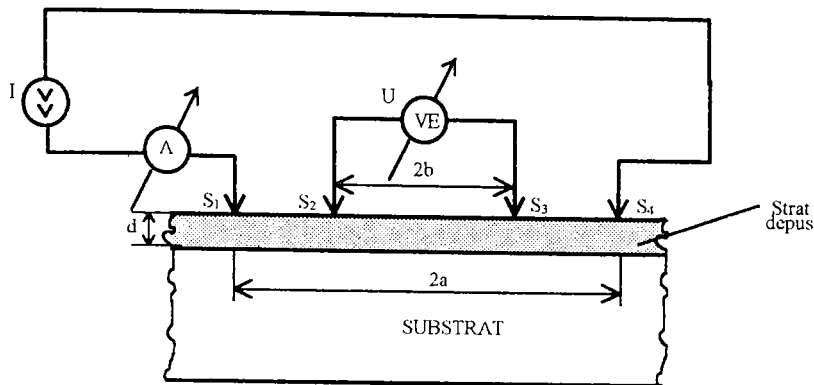


Fig.2.19. Determinarea rezistivității straturilor subțiri cu metoda celor patru sonde.

Rezultatul măsurărilor, se înmagazinează în memoria sistemului numeric de calcul, sau se programează prin software în vederea corecției rezultatelor.

Metoda capacitivă, este de asemenea utilizată, pentru măsurarea și controlul grosimii SS, în timpul procesului de obținere.

Principiul metodei, se bazează, pe modificarea capacității unui condensator plan:

$$\Delta C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{\Delta d} \quad (2.16)$$

atunci când se modifică natura (ϵ_r) și grosimea (Δd) dielectricului. Traductorul utilizat este realizat pe un suport dielectric, dintr-o folie de aluminiu sub forma unui condensator interdigital (figura 2.20.).

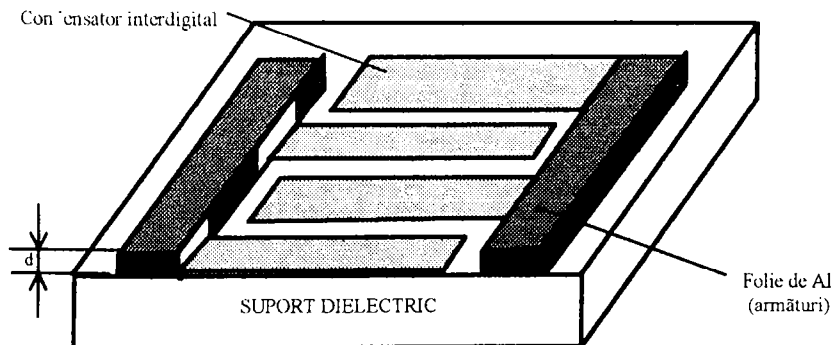


Fig.2.20. Traductor interdigital pentru determinarea grosimii SS.

Materialul evaporat a cărui grosime urmează să fie determinată, se depune pe suprafața activă a condensatorului (între dinți) și modifică valoarea nominală a capacității care este evidențiată prin metode sensibile în punte.

Metoda este aplicabilă numai straturilor subțiri dielectrice și prezintă inconvenientul generat de schimbarea și curățirea traductorului după fiecare depunere. În plus, condițiile efective în care are loc depunerea (temperatură, presiune, etc.) sau oxizii și vaporii de apă aflați pe suprafața substratului influențează apreciabil precizia măsurărilor.

O altă variantă, a procedurilor capacitive de măsurare și control a grosimii stratului depus este prezentată schematic în figura 2.21.

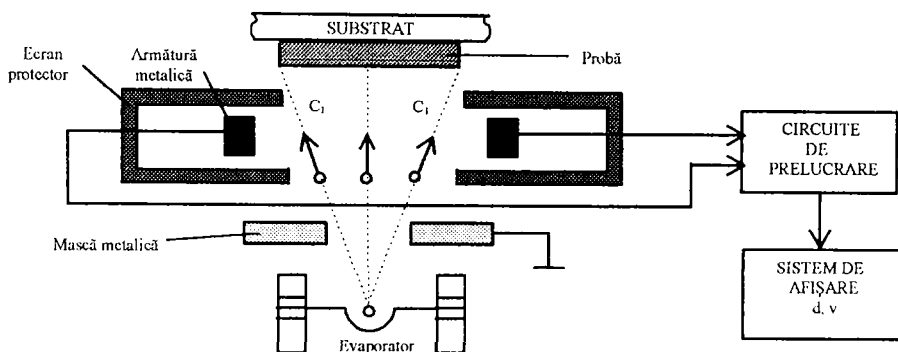


Fig.2.21. Schema instalației pentru determinarea grosimii SS prin metoda capacitivă.

Principiul metodei constă în măsurarea variației capacității sistemului de plăci atunci când printre armături, trece fluxul de particule al substanței evaporate. Evident, metoda dă rezultate bune, îndeosebi la determinarea grosimii straturilor subțiri din materiale dielectrice, în condiții de evaporare, (t_{evap} , t_{substrat} , P , etc.) riguros constante. Precizia măsurărilor este influențată sensibil de efectul difuziei laterale a moleculelor pe suprafața armăturilor, cu toate că ecranul protejează-în principiu- plăcile condensatorului.

Metoda inductivă, este utilizată pentru determinarea grosimii straturilor subțiri din materiale feromagnetice depuse pe suporturi izolatori. Schema bloc, simplificată a unei instalații pentru determinarea grosimii SS, bazată pe metoda inductivă, este prezentată în figura 2.22.

Traductorul utilizat, este o tijă metalică sau de ferită, având capătul inferior rotunjit spre a nu deteriora proba de măsurat. Pe tijă sunt conectate două bobine B_1 și B_2 cuplate magnetic. Bobina B_1 , se conectează la bornele unui generator de curent alternativ de înaltă frecvență, care induce în bobina receptoare B_2 un semnal alternativ de aceeași frecvență dar cu amplitudinea dependentă de grosimea stratului feromagnetic prin care se închid liniile de câmp magnetic. Cunoscând că pentru

grosimi mici ale stratului depus ($d \leq 10 \mu\text{m}$) variația tensiunii induse în bobina B_2 este cu bună aproximație liniară:

$$\Delta U = K \cdot \Delta d \quad (2.17)$$

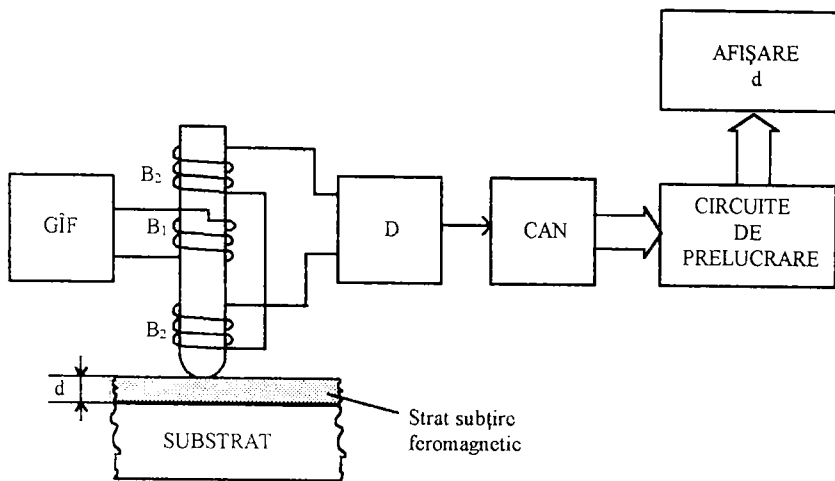


Fig.2.22. Schema simplificată a unei instalații pentru determinarea grosimii SS bazată pe metoda inductivă.

semnalul recepționat este detectat, convertit numeric, prelucrat și afișat pe un display. Etalonarea aparatului se realizează de obicei, prin metode de comparație. Valoarea de zero, se marchează, atunci când între tija traductorului și substrat, se realizează un contact întim, iar capătul de scală, se determină prin introducerea între traductor și substrat a unui strat subțire feromagnetic, având grosimea cunoscută prin alte procedee.

Metoda manometrului de ionizare constă în ionizarea fluxului de particule evaporate (sau a unei părți din acest fascicul) și măsurarea curentului ionic cu ajutorul unui manometru de ionizare. Curentul ionic, I_i , fiind proporțional, cu numărul total de atomi din incintă, n_i , multiplicat cu probabilitatea lor de ionizare, p_i :

$$I_i = p_i \cdot n_i \quad (2.18)$$

rezultă că între viteza de evaporare v și curentul de ionizare I_i , va exista o relație de dependență liniară:

$$v = K \cdot I_i \quad (2.19)$$

Trebuie remarcat însă, că în incinta vidată există gaze reziduale, ceea ce face ca la viteze mici de evaporare, curentul ionic al acestor gaze I_g să fie comparabil cu cel al moleculelor substanței evaporate I_v . Pentru separarea celor doi curenți în practică se utilizează două procedee:

a) Aplicarea unui ecran rotitor, dispus în calea fascicului evaporat (figura 2.23.) care produce o modulație a curentului ionic corespunzător cantității de substanță evaporată, care pătrunde în regiunea de detecție a manometrului de ionizare.

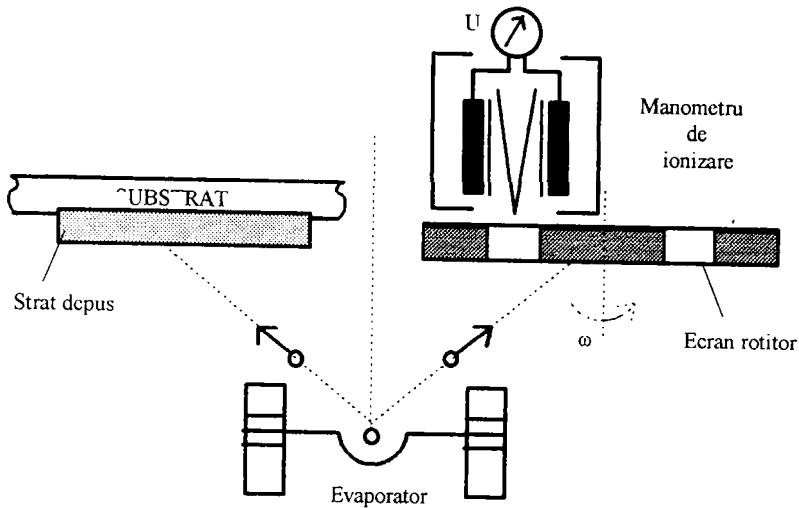


Fig.2.23. Modularea curentului ionic cu ecranul rotitor.

Instrumentul de măsurat cuplat la traductorul de ionizare va fi sensibil numai la curentul ionic modulat cu o frecvență de 6Hz, adică numai la curentul de ionizare, proporțional cu cantitatea substanței evaporate.

b) Aplicarea unui ecran vibrator (figura 2.24.) cu o frecvență de 20-30Hz, permite o mai bună separare a curentului ionic și deci un control mai precis al vitezei de condensare a moleculelor pe substrat.

Semnalul electric, detectat de traductorul ionic, este amplificat, prelucrat și aplicat unui indicator al vitezei de condensare a moleculelor pe substrat. Pentru determinarea grosimii stratului se efectuează integrala în timp a componentei variabile a curentului ionic I_v :

$$d = \frac{1}{G} \int_0^{t_0} I_v(t) dt \quad (2.20.)$$

unde G , este un factor de scală ce depinde de geometria traductorului ionic.

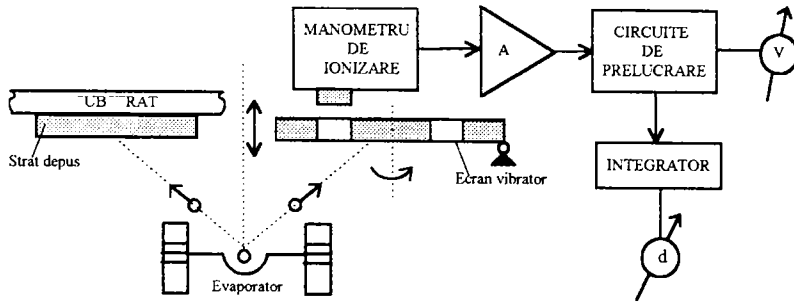


Fig.2.24. Modularea curentului ionic cu ecranul vibrator.

În figura 2.25. este prezentată orientativ, dependența grosimii straturilor subțiri din Al, Ni și Cr, de valoarea sarcinii electrice măsurată cu manometrul de ionizare.

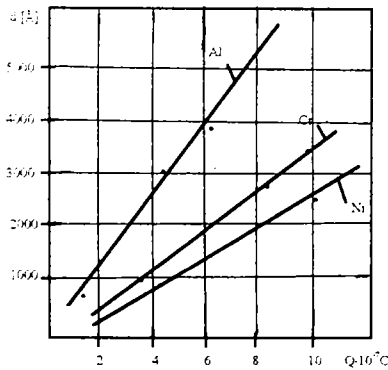


Fig.2.25. Dependența grosimii straturilor subțiri de valoarea sarcinii electrice măsurată cu manometrul de ionizare.

Deși metoda prezentată implică utilizarea unui echipament complex, este adesea utilizată în condiții de laborator, îndeosebi datorită universalității ei.

2.5. CONCLUZII

Studiul efectuat, arată că grosimea stratului depus, constituie un parametru fizic, geometric și tehnologic, măsurabil direct sau indirect, fie în timpul procesului de depunere, fie după scoaterea probei din instalația în care a fost obținută. Analiza

referințelor bibliografice, a permis evidențierea unei multitudini, de metode și procedee, pentru măsurarea grosimii SS, care nu sunt în totalitate suficient de precise sau comode de aplicat, în producția de serie a peliculelor subțiri, sau a dispozitivelor electronice realizate cu acestea. Prezentarea în sinteză a principalelor metode și procedee utilizate la măsurarea grosimii SS a permis desprinderea unor concluzii prezentate sintetic în Tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Rezumat al principalelor tehnici utilizate la măsurarea și controlul grosimii SS.

METODA		DOMENIUL DE MĂSURARE	REZOLUȚIA SAU PRECIZIA	APLICAȚII
ME- CA- NI- CE	MICROCĂNTĂRIRE	1 Å - fără limită	1 Å ; 1%	Straturi cu densitatea bine determinată
	BALANȚA DE TORSIUNE	1Å - 1000 Å	1 Å ; ±0,2%	Materiale cu densități ridicate
	PALPATORUL MECANIC	20Å - fără limită	1 Å ; 3%	Materiale metalice
	SISTEME PIVOTANTE	50Å - fără limită	2Å ; 5%	Metale dielectrice și semiconductori
OP- TI- CE	FOTOMETRICĂ	1 - 100μm	0,2μ ; 2%	Straturi transparente pe substraturi transparente
	ELIPSOMETRICĂ	1Å - 1μm	1Å ; 0,1%	Straturi transparente
	INTERFEROMETRICĂ	30 - 20000Å	±10Å	Straturi reflectorizante
	DUPA CULOARE	500 - 15000 Å	100 - 200Å	SiO ₂ pe substrat Ta ₂ O ₅ substrat de Ta
RA- DIO- ME- TRI- CE	ATENUAREA RADIAȚIEI	0,1 - 1μm	±5%	Straturi dielectrice cu conductibilitate scăzută
	EMISIA RADIAȚIEI	20 - 10000Å	±2%	Straturi suprapuse
	BOMBARDAMENT CU PARTICULE	0,1 - 50μm	±6%	Straturi de mare conductibilitate
	DIFRAȚIA SI FLORESCENȚA	0 - 100Å	±1Å	Straturi cu conductibilitate electrică scăzută
E- LEC- TRI- CE	REZISTIVE	10Å - 1μm	±20%	Metale sau materiale conductoare
	CAPACITIVE	100Å - 1μm	±50%	Dielectrice sau materiale semiconductoare
	INDUCTIVE	200Å - 1μm	±30%	Materiale feromagnetice
	MANOMETRUL DE IONIZARE	1Å - 1μm	2%	Straturi diferite suprapuse

Se constată că, procedeele mecanice sunt caracterizate prin universalitate, fiind aplicabile la măsurarea grosimii SS metalice, dielectrice sau semiconductoare, atât în timpul depunerii stratului, cât și după scoaterea probei din incinta vidată. Aceste metode sunt aplicabile, în condiții de laborator și dau rezultate bune, mai ales la măsurarea grosimii straturilor mai groase ($d \geq 0,2\text{mm}$) la care se cunoaște cu suficientă precizie densitatea materialului depus. Având o precizie scăzută și fiind incomode din punct de vedere al posibilităților de automatizare a procesului de depunere, procedeele mecanice de măsurare a grosimii SS, sunt evitate în microelectronică.

Procedeele optice de măsurare a grosimii SS, se caracterizează prin precizie și sensibilitate ridicată. Metoda fotometrică și metoda elipsometrică, se utilizează la determinarea grosimii stratului depus în timpul formării sale, iar metoda interferomagnetică se aplică la măsurarea grosimii SS, după ce probele au fost scoase din incinta vidată. Deși prezintă același dezavantaj ca și procedeele de măsurare mecanică, privind posibilitățile limitate de automatizare a instalației de depunere, determinarea grosimii peliculelor după culoarea stratului, se aplică curent în microelectronică (mai ales la aprecierea grosimii straturilor dielectrice utilizate la pasivizări sau izolări).

Procedeele radiometrice de măsurare a grosimii SS, sunt în general mai puțin utilizate în microelectronică, ele solicitând surse și detectoare adecvate măsurării grosimii prin absorbția sau reflexia radiațiilor în/din strat. Mai mult, metoda este limitată din punct de vedere al grosimilor maxime măsurabile, atunci când se urmărește detectarea emisiei radioactive din probă.

Metodele electrice pentru măsurarea și controlul grosimii SS, sunt singurele capabile să faciliteze automatizarea procesului de depunere. Determinarea grosimii straturilor, prin măsurarea rezistenței electrice este aplicabilă metalelor și straturilor semiconductoare, cu o rezistență nu prea ridicată. Întrucât, metoda presupune cunoașterea cu precizie a rezistivității stratului măsurat și menținerea riguroasă a condițiilor experimentale de pregătire a probelor, în producția de serie, a straturilor subțiri, aria de aplicabilitate este limitată, îndeosebi la determinarea grosimii metalelor sau a materialelor conductoare.

Metodele capacitive de măsurare și control a grosimii SS, fiind aplicabile numai materialelor dielectrice cu o permitivitate ridicată și oferind o precizie scăzută a măsurărilor, sunt rar utilizate în microelectronică. Metodele inductive, din rațiuni similare, au o arie de aplicabilitate mai restrânsă, fiind recomandate mai ales la determinarea grosimii straturilor feromagnetice.

Metoda manometrului de ionizare permite măsurarea grosimii SS de natură diferită, depuse succesiv, dar presupune o construcție complexă care nu-și justifică prețul de cost pentru aplicațiile industriale de mare precizie.

În final, trebuie remarcat că funcție de natura aplicației, de disponibilitățile tehnologice și financiare, sau de precizia solicitată la măsurare, pot fi utilizate oricare din procedeele de măsurare și control a grosimii SS prezentate anterior.

CAPITOLUL 3

METODA OPTIMALĂ DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI, DEPUSE SUCCESIV ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT

Dintre metodele și procedeele cunoscute, pentru măsurarea și controlul grosimii SS, utilizate curent în microelectronică, am reținut pentru analiză, metoda cuarțului rezonant care răspunde cel mai bine, cerințelor formulate la paragraful 1.3. Principiul metodei se bazează pe modificarea frecvenței de rezonanță a unui oscilator cu cuarț, plasat în incinta vidată (figura 3.1.), la creșterea masei (respectiv grosimii) traductorului de cuarț, datorită stratului depus.

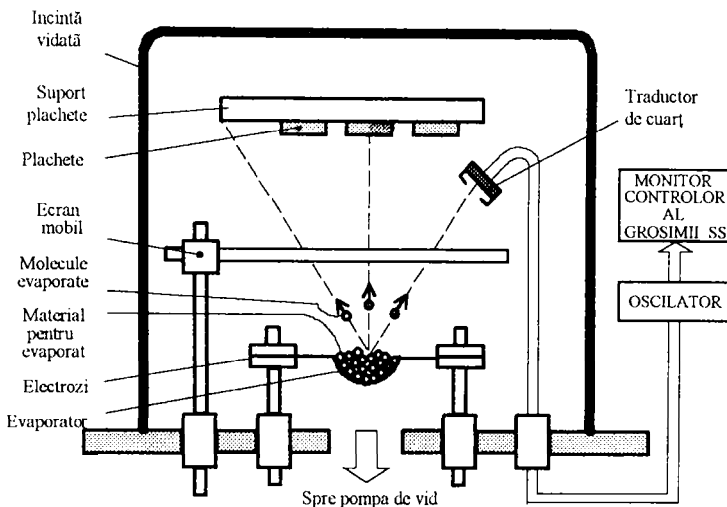


Fig.3.1. Plasarea traductorului piezoelectric în incinta vidată.

Metoda cuarțului rezonant prezintă avantajul universalității, fiind aplicabilă la măsurarea și controlul grosimii SS metalice, dielectrice sau semiconductoare. Din acest motiv, cât și datorită preciziei oferite la măsurare, o vom considera ca referință în dezvoltarea unei metode optimale de măsurare și control a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt.

3.1. METODA CUARȚULUI REZONANT

Pentru determinarea grosimii straturilor subțiri, prin metoda cuarțului rezonant, se cere precizarea următoarelor mărimi:

d_s - grosimea stratului depus	[cm]
ρ_d - densitatea cuarțului	[g/cm ³]
ρ_s - densitatea stratului depus	[g/cm ³]
d_q - grosimea inițială a cuarțului	[cm]
f_0 - frecvența de rezonanță a cristalului neîncărcat	[Hz]
f - frecvența de rezonanță a cristalului cu stratul depus	[Hz]
$N_q = f_0 d_q$ - constanta de frecvență a cristalului de cuarț	[Hz·cm]
m_0 - masa inițială a cristalului de cuarț	[g]
S - suprafața traductorului pe care se realizează depunerea	[cm ²]

Dacă Δm este masa stratului depus, din relația:

$$\Delta m = S \cdot d_s \cdot \rho_s \quad (3.1)$$

se deduce grosimea stratului subțire:

$$d_s = \frac{\Delta m}{S \cdot \rho_s} \quad (3.2)$$

Frecvența de rezonanță a cristalului de cuarț, se modifică de la valoarea f_0 (corespunzătoare grosimii $d_s = 0$) cu cantitatea $\Delta f = f - f_0$, datorită modificării masei traductorului cu mărimea Δm conform relației /100/:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = - \frac{\Delta m}{m_0} \quad (3.3)$$

Eliminând Δm între relațiile (3.2) și (3.3) se obține:

$$d_S = \frac{m_0}{f_0 \cdot S \cdot \rho_S} (-\Delta f) \quad (3.4)$$

sau forma echivalentă:

$$d_S = \frac{N_q \cdot \rho_q}{\rho_S \cdot f_0^2} (f_0 - f). \quad (3.5)$$

Determinarea grosimii straturilor subțiri utilizând relațiile (3.4) sau (3.5) este cunoscută în literatură sub denumirea de “tehnica de măsurare a frecvenței” întrucât grosimea peliculei depuse este direct proporțională cu diferența de frecvență Δf . Pentru a menține eroarea măsurătorilor în limite rezonabile ($\varepsilon < 1\%$) se recomandă ca variația maximă de frecvență admisă prin această tehnică să nu depășească 10% din valoarea frecvenței de rezonanță a cristalului neîncărcat f_0 :

$$|\Delta f| \leq 0,1 f_0 \quad (3.6)$$

În prezent, pentru creșterea preciziei la măsurare (îndeosebi în domeniul grosimilor foarte mici) se utilizează așa numita “tehnică de măsurare a perioadei”. Ecuația de bază utilizată la măsurarea grosimii SS prin această tehnică este /59/:

$$d_S = \frac{N_q \cdot \rho_q \cdot f}{\rho_S \cdot f_0} (t - t_0) = K(t - t_0) \quad (3.7)$$

unde: $t_0 = 1/f_0$ și $t = 1/f$, reprezintă perioadele de oscilație ale cristalului neîncărcat și respectiv cu stratul depus.

Utilizând aparatură electronică adecvată, se pot pune în evidență variații ale frecvenței de rezonanță $\Delta f = 2$ Hz, ceea ce la $f_0 = 10$ MHz reprezintă variații de masă $\Delta m = 10^{-8}$ mg/cm² și respectiv măsurarea cu precizie a grosimilor de ordinul $n \cdot 10^{-10}$ m. Dezavantajul principal al metodei prezentate constă în aceea că nu permite măsurarea grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic, deoarece traductorul trebuie curățat chimic după fiecare depunere.

3.2. CREȘTEREA PRECIZIEI LA MĂSURAREA GROSIMII SS UTILIZÂND METODA CUARȚULUI REZONANT

Relațiile prezentate pentru grosimea stratului depus în cadrul metodei cuarțului rezonant sunt valabile, considerând că masa stratului depus pe traductor este mult mai mică decât masa cristalului de cuarț și neglijând influența sarcinilor electrice și a tensiunilor elastice care apar la contactul a două materiale diferite (inclusiv la contactul traductor-strat depus). Aceasta este desigur motivația pentru care

producătorii de aparatură de măsurare și control a grosimii SS, bazate pe metoda cuarțului rezonant, garantează precizia instalațiilor furnizate numai pentru variații ale frecvenței de rezonanță care respectă relația (3.6). Studii recente /60/ au arătat că pentru variații ale frecvenței de rezonanță mai mari decât 2% din f_0 , erorile produse la măsurare cresc semnificativ. Cercetările efectuate au arătat că o relație corectă de dependență grosime-frecvență, care să elimine restricțiile impuse variației frecvenței de rezonanță a cristalului de cuarț se poate obține prin luarea în considerație a proprietăților elastice ale materialelor depuse pe suprafața traductorului. Dacă μ_S și μ_q reprezintă modulul de elasticitate al peliculei depuse respectiv al cristalului de cuarț și se notează cu Z impedanța acustică definită prin ecuația:

$$Z = \sqrt{\frac{\rho_q \cdot \mu_q}{\rho_S \cdot \mu_S}} \quad (3.8)$$

relația de dependență grosime-frecvență raportată /58/ este de forma:

$$d_S = \frac{N_q \cdot \rho_q}{\pi \cdot Z \cdot \rho_S \cdot f_0} \operatorname{tg}^{-1} \left\{ Z \cdot \operatorname{tg} \left[\frac{(f_0 - f)}{f_0} \right] \right\} = k_C \cdot \frac{N_q \cdot \rho_q}{\rho_S \cdot f_0^2} (f_0 - f) \quad (3.9)$$

unde k_C este un coeficient de corecție.

Ecuatia (3.9) arată că materialele cu proprietăți elastice diferite (cum este cazul straturilor de natură diferită depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic) descriu relații grosime-frecvență diferite. Printr-un simplu exercițiu algebric se poate demonstra că tehnica de măsurare a perioadei descrisă de relația (3.7) este un caz particular al ecuației (3.9) pentru $Z=1$ și tehnica de măsurare a frecvenței descrisă de relația (3.5) este încă un caz particular pentru $\Delta f \ll f_0$. Prin utilizarea la măsurarea grosimii SS a relației (3.9), se asigură precizii mai bune de 1% pentru un domeniu de variație a frecvenței de rezonanță a cristalului de cuarț de până la 20% din f_0 .

În tabelul 3.1. se prezintă valorile calculate ale impedanței acustice pentru cele mai uzuale materiale utilizate în microelectronică. Întrucât se constată că majoritatea materialelor folosite ca straturi subțiri au $Z \neq 1$, se impune pentru creșterea preciziei la măsurare, utilizarea relației (3.9) în realizarea echipamentelor electronice de măsurare și control a grosimii SS.

Tabelul 3.1. Valorile calculate ale impedanței acustice pentru cele mai uzuale materiale din microelectronică.

MATERIAL	C	Mg	Pb	Al	SiO ₂	As	In	InSb	Sn	Si
Z	3,260	1,610	1,130	1,080	1,070	0,966	0,841	0,769	0,724	0,712
MATERIAL	Cd	Ti	Ag	Cu	Au	Co	Cr	Ta	Pt	W
Z	0,682	0,628	0,529	0,437	0,381	0,343	0,305	0,262	0,245	0,163

3.3. METODĂ OPTIMALĂ DE MĂSURARE ȘI CONTROL A GROSIMII ȘI DE NATURĂ DIFERITĂ DEPUSE SUCCESIV ÎN INSTALAȚII DE VID ÎNALT

Fie $n \in N$ straturi subțiri de natură diferită, caracterizate prin densitățile $\rho_1, \rho_2 \dots \rho_n$ ce urmează a fi depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic, la grosimile prestabilite, $d_1, d_2 \dots d_n$. Grosimea d_1 a primului strat depus, funcție de parametrii traductorului: m_0 (masa cristalului de cuarț neîncărcat), S (suprafața pe care are loc depunerea), f_0 (frecvența inițială de rezonanță) și de natura materialului depus, caracterizat prin densitatea ρ_1 , se poate exprima utilizând metoda cuarțului rezonant sub forma:

$$d_1 = \frac{m_0}{f_0 \cdot S \cdot \rho_1} (f_0 - f_1) \quad (3.10)$$

unde f_1 reprezintă frecvența de rezonanță a traductorului, corespunzătoare atingerii grosimii d_1 .

Depunerea stratului următor, are ca efect scăderea frecvenței de rezonanță a traductorului la valoarea f_2 corespunzătoare creșterii grosimii cu valoarea d_2 . La masa inițială m_0 a traductorului trebuie adăugată acum masa stratului depus anterior:

$$m_1 = d_1 \cdot S \cdot \rho_1 \quad (3.11)$$

Ca urmare, grosimea d_2 a celui de-al doilea strat depus, se va calcula cu relația:

$$d_2 = \frac{m_0 + d_1 \cdot S \cdot \rho_1}{f_1 \cdot S \cdot \rho_2} (f_1 - f_2) \quad (3.12)$$

Un raționament analog, arată că pentru grosimea d_n , a celui de-al n -lea strat depus succesiv, se obține relația:

$$d_n = \frac{m_0 + \sum_{k=1}^{n-1} d_k \cdot S \cdot \rho_k}{f_{n-1} \cdot S \cdot \rho_n} (f_{n-1} - f_n) \quad (3.13)$$

Dacă se adoptă pentru evaluarea grosimii, tehnica de măsurare a frecvenței, este util să se exprime deviațiile de frecvență Δf_i ale traductorului, corespunzătoare depunerii fiecărui strat subțire, de grosime prestabilă.

Pentru primul strat depus la grosimea d_1 , deviația corespunzătoare de frecvență, va fi:

$$\Delta f_1 = \frac{d_1 \cdot S \cdot \rho_1}{m_0} f_0 \quad (3.14)$$

Depunerea stratului următor, modifică, frecvența de rezonanță a cristalului de cuarț, cu valoarea:

$$\Delta f_2 = \frac{d_2 \cdot S \cdot \rho_2}{m_0 + d_1 \cdot S \cdot \rho_1} f_1 \quad (3.15)$$

Având în vedere că:

$$f_1 = f_0 \left(1 - \frac{d_1 \cdot S \cdot \rho_1}{m_0} \right) \quad (3.16)$$

rezultă pentru Δf_2 relația:

$$\Delta f_2 = \frac{d_2 \cdot S \cdot \rho_2 \left(1 - \frac{d_1 \cdot S \cdot \rho_1}{m_0} \right)}{m_0 + d_1 \cdot S \cdot \rho_1} f_0. \quad (3.17)$$

Procedând prin recurență, se obține pentru deviația de frecvență Δf_n corespunzătoare depunerii stratului n expresia:

$$\Delta f_n = \frac{d_n \cdot S \cdot \rho_n \prod_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{d_k \cdot S \cdot \rho_k}{m_0 + \sum_{k=1}^{n-1} d_{k-1} \cdot S \cdot \rho_{k-1}} \right)}{m_0 + \sum_{k=1}^{n-1} d_n \cdot S \cdot \rho_k} f_0 \quad (3.18)$$

Relațiile stabilite pentru grosimea depunerilor d_n și deviațiile de frecvență corespunzătoare ale traductorului Δf_k , rămân valabile, în ipoteza simplificatoare că rezultatele măsurătorilor, sunt independente de parametrii de proces (presiune, temperatură, poziționarea traductorului în incintă, etc.) și dacă se neglijează influența sarcinilor electrice și a tesionilor elastice, care apar la contactul a două materiale diferite. Dacă se notează cu k_i coeficienții de corecție, calculați numeric pe baza relațiilor de influență a fenomenelor descrise mai sus (utilizând relația 3.9.) expresiile corectate care dau grosimea d_n a stratului depus, respectiv devierea de frecvență Δf_n corespunzătoare, devin:

$$d_n = \frac{m_0 + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \cdot d_i \cdot S \cdot \varrho}{R_n \cdot f_{n-1} \cdot S \cdot \varrho_{ii}} (f_{n-1} - f_n) = K'_d \cdot \Delta f_n \quad (3.19)$$

$$\Delta f_n = \frac{R_n \cdot d_n \cdot S \cdot \varrho \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{R_i \cdot d_i \cdot S \cdot \varrho}{m_0 + \sum_{i=1}^{n-1} R_{i-1} \cdot d_{i-1} \cdot S \cdot \varrho_{i-1}} \right)}{m_0 + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \cdot d_i \cdot S \cdot \varrho} f_0 = K''_d \cdot f_0 \quad (3.20)$$

unde K'_d și K''_d sunt coeficienții de proporționalitate care pot fi calculați numeric sau pot fi programați prin soft.

Un parametru important, care trebuie controlat continuu în timpul procesului tehnologic (deoarece oferă informații asupra uniformității stratului depus) este rata depunerii r_d definită ca raportul dintre diferența grosimilor instantanee d'_i, d''_i măsurate la momentele t', t'' și intervalul de timp dintre măsurători:

$$r_d = - \frac{d'_n - d''_n}{t' - t''} \quad (3.21)$$

Dacă se are în vedere relația (3.13) rezultă:

$$\begin{aligned} r_{d_n} &= \frac{m_0 + \sum_{i=1}^{n-1} d_i \cdot S \cdot \varrho}{S \cdot \varrho_n (t' - t'')} \cdot f_n \left(\frac{1}{f'_n} - \frac{1}{f''_n} \right) = \\ &= \frac{m_0 + \sum_{i=1}^{n-1} d_i \cdot S \cdot \varrho}{S \cdot \varrho_n \cdot t_n (t' - t'')} (t'_n - t''_n) = K'_r \cdot \Delta t_n \end{aligned} \quad (3.22)$$

Ținând seama de expresia exactă a grosimii măsurate (relația 3.19) se obține pentru rata depunerii relația:

$$\begin{aligned} r_{d_n} &= \frac{m_0 + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \cdot d_i \cdot S \cdot \varrho}{R_n \cdot S \cdot \varrho_n (t' - t'')} f_n \left(\frac{1}{f'_n} - \frac{1}{f''_n} \right) = \\ &= \frac{m_0 + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \cdot d_i \cdot S \cdot \varrho}{R_n \cdot S \cdot \varrho_n \cdot t_n (t' - t'')} (t'_n - t''_n) = K''_r \cdot \Delta t_n \end{aligned} \quad (3.23)$$

unde diferența: $t' - t''$ se ia de obicei egală cu $1s$ și de aici exprimarea ratei depunerii în $[\text{Å}/s]$. Se constată din relațiile prezentate, compatibilitatea determinării ratei depunerii cu tehnica de măsurare a perioadei.

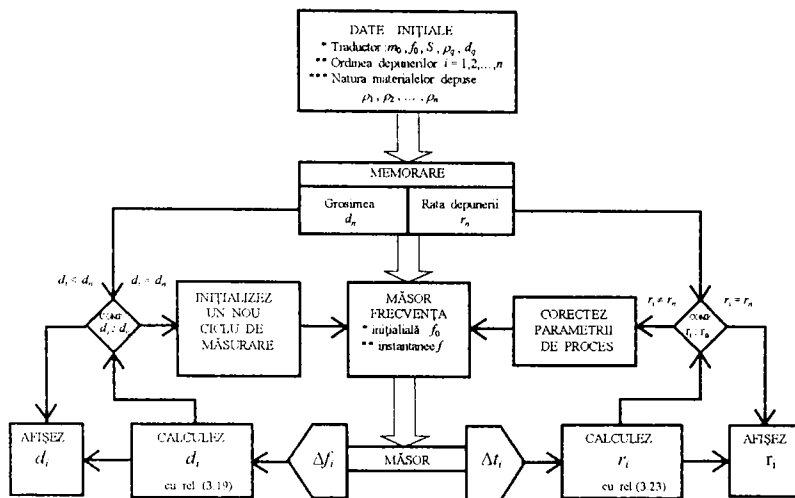


Fig.3.2. Ordinograma metodei de măsurare și control în timpul procesului tehnologic a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații de vid înalt.

Pe baza formalismului matematic prezentat, se poate dezvolta o metodă de măsurare și control în timpul procesului tehnologic, a grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt. În figura 3.2. se prezintă sub formă de ordinogramă principiul metodei.

Datele inițiale referitoare la caracteristicile tractorului utilizat (masa m_0 , frecvența cristalului neîncărcat f_0 , suprafața depunerii S , densitatea cuarțului ρ_q , grosimea inițială a cuarțului d_q) și ale materialelor care urmează să se depună (numărul i al depunerilor în ordinea în care au loc și densitățile ρ_i ale materialelor depuse) sunt disponibile sistemului de calcul (al grosimii respectiv al ratei depunerii). Se memorează apoi grosimile $d_1, d_2 \dots d_n$ prescrise pentru fiecare strat depus și ratele corespunzătoare $r_1, r_2, \dots r_n$ dorite a se realiza. Se poate inițializa acum, ciclul de măsurare, prin afișarea frecvenței instantanee f_i , a deviației momentane de frecvență Δf_i respectiv a perioadei Δt_i . Se calculează cu relațiile deduse, grosimea (relația 3.19) și rata instantanee (relația 3.23), care se compară mereu cu valorile impuse. Dacă nu s-au atins valorile prestabilite rezultatul se afișează. Realizarea grosimii dorite și/sau obținerea unei rate a depunerii diferită de cea dorită, acționează automatic sistemului, care corectează parametrii de proces sau/și inițializează un nou ciclu de măsurare a parametrilor stratului următor. Pe baza metodei prezentate, în capitolul 4 se analizează

construcția și funcționarea unei instalații de măsurare și control în timpul procesului tehnologic a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt /24/.

3.4. EVALUAREA ERORILOR PRODUSE LA MĂSURAREA GROSIMII SS DATORITĂ POZIȚIONĂRII TRADUCTORULUI ÎN INCINTA VIDATĂ

În procesul de măsurare și control a grosimii SS, pe lângă erorile de metodă și erorile instrumentale, o sursă sistematică de erori reziduale, o constituie poziționarea încorectă a traductorului, în raport cu placheta pe care se realizează depunerea utilă. Dacă se admite că evaporarea are loc dintr-un izvor punctiform, care eliberează N molecule în unitatea de timp cu viteză constantă, se obține pentru grosimea momentană d a peliculei depuse, expresia /91/:

$$d = \frac{m_m \cdot N \cdot \cos\theta}{\rho \cdot 4\pi r^2} \quad (3.24)$$

unde: m_m - masa molară a peliculei evaporate, ρ - densitatea materialului condensat, θ - unghiul solid sub care se realizează evaporarea și r - distanța evaporator-substrat.

Această relație arată că grosimea stratului depus nu depinde de suprafața pe care se condensează, ci numai de poziția spațială a suprafeței respective în incinta vidată. Pornind de la această constatare, vom stabili dependența grosimii SS, de poziția traductorului în incintă, prin evaluarea grosimii straturilor depuse pe suprafața traductorului, comparativ cu grosimea straturilor depuse pe suportul cu plachete. Analiza erorilor produse la măsurare, se va efectua separat, pentru fiecare din cele trei modalități practice de poziționare a traductorului, în incinta vidată /21/.

a) TRADUCTOR POZIȚIONAT ÎN ACELAȘI PLAN CU SUPORTUL PLACHETĂ

În figura 3.3. este prezentată schematic, construcția în care traductorul piezoelectric T și suportul plachetă SP, sunt situate în același plan P, la distanța x unul față de celălalt.

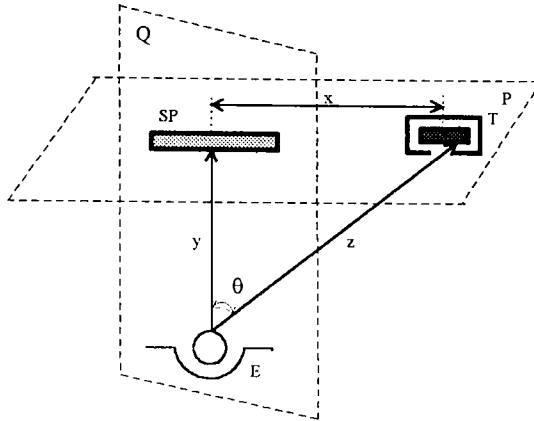


Fig.3.3. Traductorul piezoelectric T și suportul plachetă SP, situate în același plan.

Suportul plachetă SP și evaporatorul punctiform E, se găsesc în același plan Q, la distanța y , măsurată între centrele lor de simetrie. Dacă se notează cu:

$$r_d = m_m \cdot N \quad (3.25)$$

masa de substanță evaporată în unitatea de timp (rata depunerii) și se ține seama de relațiile geometrice:

$$\cos\theta = \frac{y}{z} \quad (3.26)$$

$$z = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.27)$$

se obține pentru grosimea stratului depus pe suprafața traductorului piezoelectric expresia:

$$d = \frac{r_d \cdot y}{4\pi\rho(x^2 + y^2)^{3/2}} \quad (3.28)$$

Un raționament analog, arată că la același moment de timp, pe suprafața plachetei pe care se realizează depunerea utilă, grosimea d_0 a stratului depus, are valoarea:

$$d_0 = \frac{1}{y^2} \cdot \frac{r_d}{4\pi\rho} \quad (3.29)$$

Împărțind membru cu membru relațiile (3.28) și (3.29) rezultă:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{y}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3.30)$$

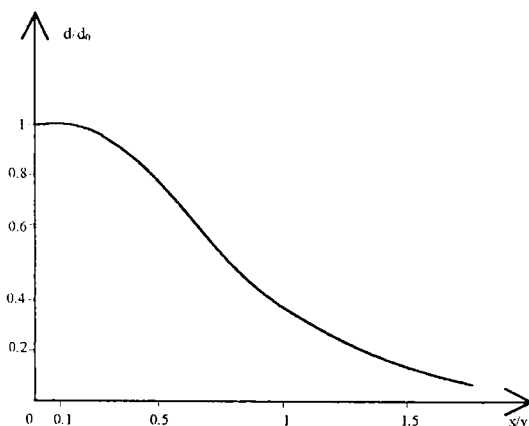


Fig.3.4. Dependența grosimii stratului măsurat de poziția traductorului, situat în același plan cu suportul plachetă.

Reprezentând grafic funcția: $\frac{d}{d_0} = F\left(\frac{x}{y}\right)$ se obține curba reprezentată în figură

3.4., care indică dependența grosimii stratului măsurat, de poziția relativă a traductorului față de placheta pe care se realizează depunerea utilă. Pentru modul de poziționare considerat, dacă se calculează eroarea relativă ε_r , care apare la măsurare datorită poziționării traductorului în același plan cu suportul plachetă, se obține relație de dependență:

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{3 \cdot \frac{x}{y}}{1 + \left(\frac{x}{y}\right)^2} \cdot 100 \quad (3.31)$$

reprezentată grafic în figura 3.5.

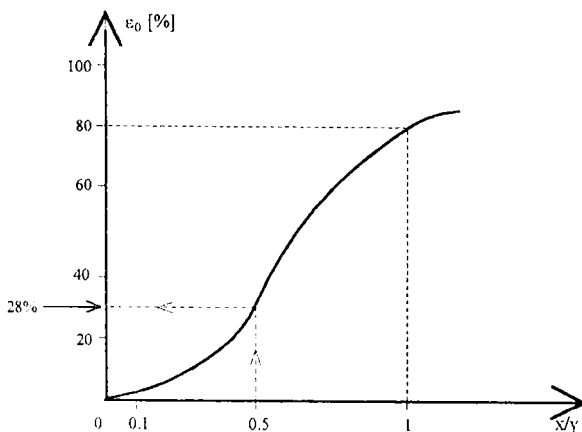


Fig.3.5. Dependența erorilor produse la măsurare de poziția traductorului situat în același plan cu suportul plachetă.

Graficul indică o creștere rapidă a erorilor relative produse la măsurarea grosimii straturilor subțiri o dată cu deplasarea traductorului în același plan cu suportul plachetă. Deoarece instalațiile de depunere a SS se realizează cu incinta vidată sub forma unor cilindri cu generatoarea comparabilă cu diametrul ($y \geq 2x$), calculând eroarea relativă care apare la măsurarea grosimii pentru $x/y=0,5$ (chiar punctul de inflexiune al graficului) se obține:

$$\varepsilon_r = 28,45 \% \quad (3.32)$$

inadmisibil de mare, pentru a nu fi luată în considerațiune în cazul măsurărilor de precizie.

b) TRADUCTOR POZIȚIONAT ÎNTR-UN PLAN PARALEL CU SUPTUL PLACHETĂ

O situație frecvent întâlnită în condițiile reale de măsurare o constituie poziționarea traductorului piezoelectric într-un plan R paralel cu planul suportului plachetă (figura 3.6.). Dacă se notează cu Δy deplasarea planului traductorului față de planul suportului plachetă, relația care stabilește grosimea stratului depus pe suprafața traductorului devine:

$$d = \frac{r_d}{4\pi\rho} \cdot \frac{y - \Delta y}{[x^2 + (y - \Delta y)^2]^{3/2}} \quad (3.33)$$

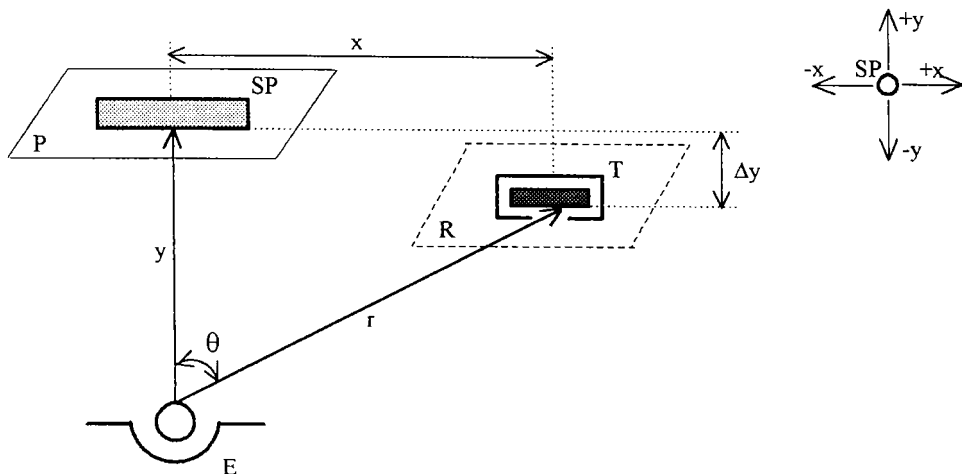


Fig.3.6. Traductorul piezoelectric T și suportul plachetă SP situate în plane paralele.

Prin împărțirea relației (3.33) cu relația (3.29) se obține:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1 - \frac{\Delta y}{y}}{\left[\left(\frac{x}{y} \right)^2 + \left(1 - \frac{\Delta y}{y} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (3.34)$$

Dependența grosimii măsurate de poziția relativă a traductorului în incintă pentru acest mod de fixare ($\frac{x}{y} = \frac{1}{2}$) este reprezentată grafic în figura 3.7.

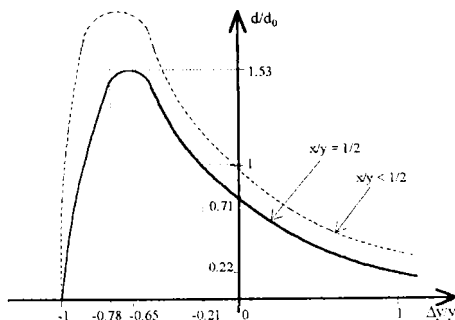


Fig.3.7. Dependența grosimii stratului măsurat de poziția traductorului, situat într-un plan paralel cu suportul plachetă

Din analiza curbelor prezentate se constată că există anumite poziții critice ale traductorului în incinta vidată, pentru care grosimea stratului depus pe suprafața traductorului, coincide cu grosimea stratului depus pe suprafața plachetei.

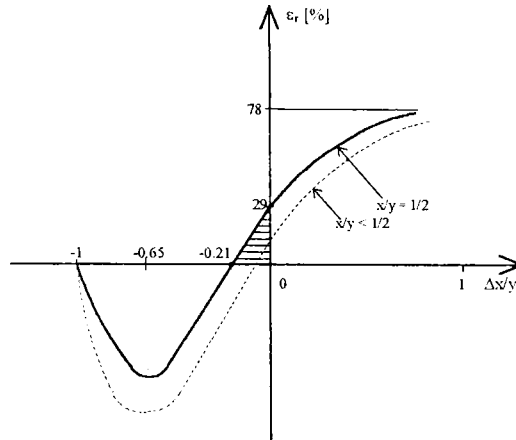


Fig.3.8. Dependența erorilor produse la măsurare, de poziția traductorului, situat într-un plan paralel cu suportul plachetă.

Funcția care descrie distribuția erorilor relative produse la măsurare, pentru acest mod de fixare $\left(\frac{x}{y} = \frac{1}{2}\right)$, a traductorului:

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{\left(\frac{x}{y}\right)^2 - 2\left(1 - \frac{\Delta y}{y}\right)^2}{\left(1 - \frac{\Delta y}{y}\right)\left[\left(\frac{x}{y}\right)^2 + \left(1 - \frac{\Delta y}{y}\right)^2\right]^{3/2}} 100 \quad (3.35)$$

este reprezentată în figura 3.8.

Se remarcă existența unor poziții spațiale, de amplasare a traductorului, în incinta vidată ($\Delta y/y=0,21$) pentru care erorile relative, produse la măsurarea grosimii SS, sunt nule.

c) TRADUCTOR POZIȚIONAT ÎNTR-UN PLAN TANGENT LA SFERELE CU CENTRUL ÎN EVAPORATOR

Dacă se consideră că moleculele evaporate sunt eliberate cu aceeași probabilitate, în toate direcțiile, apare normal să ne gândim că cea mai potrivită dispunere a traductorului în incinta vidată, este tangent la sfera cu centrul în evaporator și de rază egală cu distanța evaporator-suport plachetă, așa cum se arată în figura 3.9.

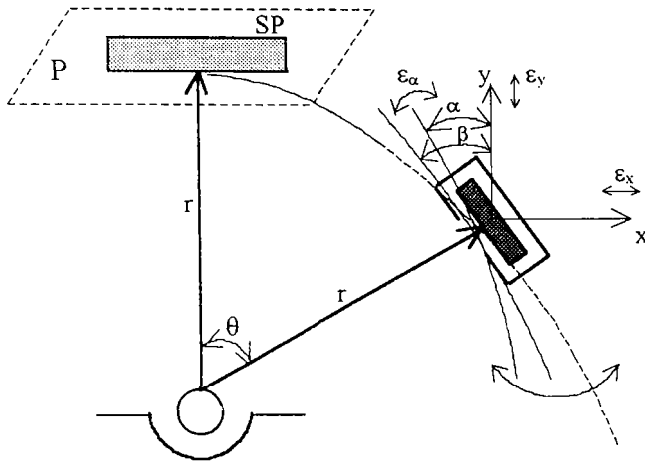


Fig.3.9. Traductorul de măsură poziționat într-un plan tangent la sferă cu centrul în evaporator și de rază egală cu distanța evaporator-suport plachetă.

În practică o astfel de poziționare spațială este dificil de realizat cu precizie, întrucât o rotire unghiulară necontrolată a planului traductorului față de planul tangent la sferă în punctul considerat este destul de probabilă. Ținând seama că deplasarea traductorului poate avea loc și după oricare din direcțiile axelor de coordonate carteziene, cu notațiile:

- ε_α - eroarea relativă produsă datorită rotațiilor unghiulare ale traductorului piezoelectric față de planul tangent la sferă
- ε_x , ε_y - erorile relative produse datorită deplasărilor traductorului pe direcțiile axelor de coordonate

se obține pentru eroarea relativă globală ε_d produsă la măsurarea grosimii SS datorită poziționării traductorului în incinta vidată, expresia:

$$\varepsilon_d = \frac{1}{r^3 \cos(\beta - \alpha)} \{ [(2y - x) \sin \alpha + (2x + y) \cos \alpha] x^2 \varepsilon_x + [(2y + x) \sin \alpha + (2x - y) \cos \alpha] y^2 \varepsilon_y + (y \cos \alpha - x \sin \alpha) r^2 \varepsilon_\alpha \} \quad (3.36)$$

Presupunând probabilistic că $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ și calculând rapoartele:

$$\left. \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_\alpha} \right|_{\varepsilon_x=0} = y \cos \alpha - x \sin \alpha \quad (3.37)$$

$$\left. \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_x} \right|_{\varepsilon_\alpha=0} = [(2y-x) \sin \alpha + (2x+y) \cos \alpha] x^2 \quad (3.38)$$

se obține relația de ordine:

$$\varepsilon_\alpha > \varepsilon_x \quad (3.39)$$

Se constată așadar, că eroarea relativă datorată netangențialității, este mai puternică decât erorile relative datorate deplasărilor traductorului, pe direcția axelor de coordonate.

Dacă se acceptă o astfel de poziționare, pentru minimizarea erorilor la măsurare, se recomandă realizarea obturatorului mecanic al traductorului de formă canonică, așa cum se exemplifică în figura 3.10.

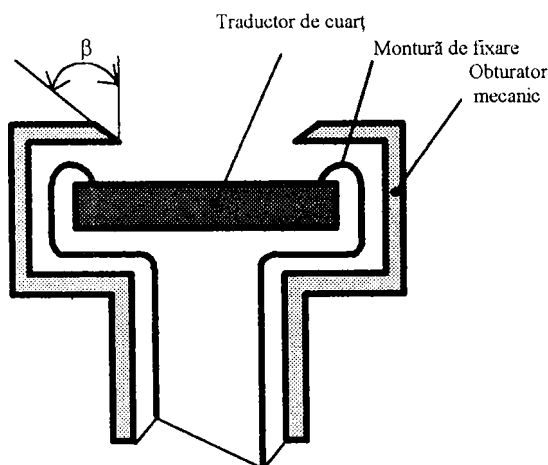


Fig.3.10. Realizarea obturatorului mecanic al traductorului de formă canonică cu $\beta = \theta$.

3.5. CONCLUZII

Dintre metodele electrice de măsurare și control a grosimii SS, metoda cuarțului rezonant este cea mai potrivită pentru aplicațiile microelectronicii, întrucât se caracterizează prin universalitate și se pretează cel mai bine la automatizarea procesului de depunere, în instalații industriale de vid înalt. A fost dedusă relația (3.5)

de dependență a grosimii stratului măsurat, de parametrii traductorului și de modificarea frecvenței de rezonanță a cristalului de cuarț față de frecvența inițială de rezonanță. S-a arătat că pentru măsurarea cu precizie a grosimilor foarte mici, este recomandată tehnica de măsurare a perioadei semnalului furnizat de traductorul piezoelectric descrisă prin relația (3.7).

Prin definirea conceptului de “impedanță acustică” s-a putut deduce o relație exactă de dependență grosime-frecvență (relația 3.9) care ia în considerație atât influența sarcinilor electrice cât și a tensiunilor elastice care apar la contactul a două materiale suprapuse de natură diferită. S-a demonstrat că materiale cu proprietăți elastice specificate, cum este cazul straturilor de natură diferită, depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic, descriu relații grosime-frecvență, diferite. Întrucât coeficientul de corecție k_C din relația (3.9) rezultă diferit de unitate, pentru creșterea preciziei la măsurare, prin metoda cuarțului rezonant, s-a impus calculul numeric al impedanței acustice, pentru cele mai uzuale materiale utilizate sub formă de SS, în microelectronică (Tabelul 3.1.).

Pentru a elimina principalul dezavantaj al metodei cuarțului rezonant, legat de înlocuirea traductorului piezoelectric după fiecare depunere, s-a procedat la elaborarea unei metode optime de măsurare și control a grosimii SS, de natură diferită, depuse succesiv, prin generalizarea într-o manieră originală a metodei cuarțului rezonant /23/. S-au dedus astfel expresiile exacte ale grosimii momentane (relația 3.19) și a vitezei de evaporare (relația 3.23) funcție de parametrii traductorului utilizat și de caracteristicile materialelor depuse. Pe baza formalismului matematic prezentat, s-a putut imagina o structură flexibilă de aparat, pentru măsurarea și controlul în timp real, a grosimii SS de natură diferită și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat.

Pe lângă evaluarea erorilor de metodă și a erorilor instrumentale s-a inițiat un studiu al erorilor, produse datorită poziționării spațiale a traductorului piezoelectric, în incinta vidată. Analizând cele trei modalități practice, de poziționare a traductorului în interiorul instalației de depunere, s-a putut constata că grosimea stratului depus nu depinde de mărimea suprafeței receptoare în incinta vidată. S-au calculat, funcțiile care descriu distribuția erorilor relative produse la măsurare pentru diferite modalități de amplasare a traductorului, evidențiind totodată pozițiile spațiale care minimizează erorile. Pentru o modalitate concretă de fixare a traductorului în incinta vidată, evaluarea erorilor produse la măsurarea grosimii SS, datorită poziționării spațiale a traductorului în raport cu suportul plachetă pe care se realizează depunerea utilă, permite printr-un soft adecvat, aplicarea de corecții, menite să conducă la creșterea preciziei măsurărilor.

CAPITOLUL 4

APARAT PENTRU MĂSURAREA ȘI CONTROLUL GROSIMII STRATURILOR SUBȚIRI DE NATURĂ DIFERITĂ DEPUSE SUCCESIV ÎN INSTALAȚII INDUSTRIALE DE VID ÎNALT

Pomind de la importanța și necesitatea măsurării cu precizie, în timp real, a grosimii SS utilizate curent în microelectronică, se impune realizarea unui aparat complex și versatil, capabil să permită implementarea formulelor matematice ce descriu dependența grosime-frecvență, precum și aplicarea corecțiilor rezultate ca urmare a poziționării spațiale a traductorului în incinta vidată.

Având în vedere, relațiile matematice deduse în Capitolul 3, pentru grosimea stratului depus (3.19) și pentru rata depunerii (3.23), se va prezenta concepția și funcționarea unui aparat electronic, destinat măsurării și controlului în timp real a grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv, în instalațiile industriale de vid înalt, denumit prescurtat MGS 01.

4.1. CONFIGURAȚIA GENERALĂ A APARATULUI

Pentru a facilita înțelegerea funcționării aparatului destinat măsurării și controlului grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic, se prezintă sintetic în ordinograma din Fig.4.1., principalele operații de inițializare, memorare, calcul și monitorizare, pe care acesta trebuie să le îndeplinească. Se constată că aparatul trebuie să permită prescrierea și memorarea atât a parametrilor traductorului cât și a caracteristicilor materialelor depuse, să dispună de un sistem de calcul a grosimii momentane și a vitezei de evaporare, și să furnizeze semnalele solicitate de echipamentul de automatizare a instalației industriale, în care are loc depunerea.

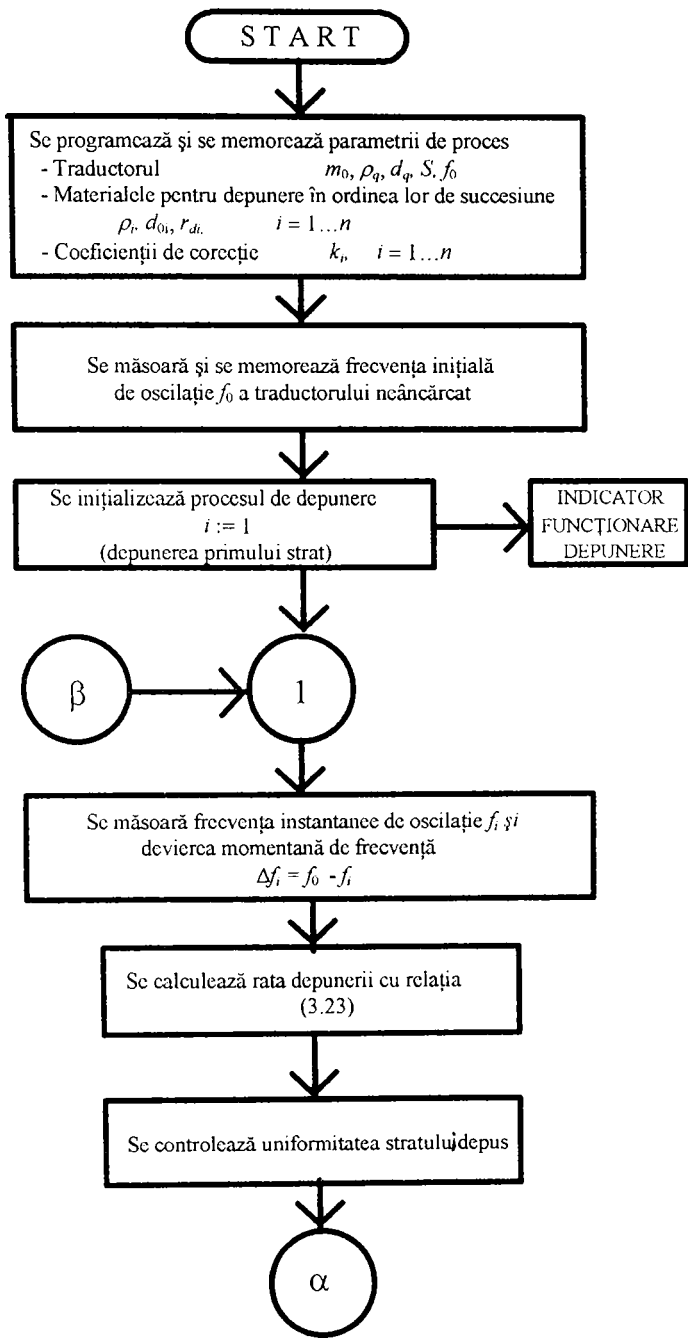


Fig.4.1.a. Ordinograma de funcționare a aparatului pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri.

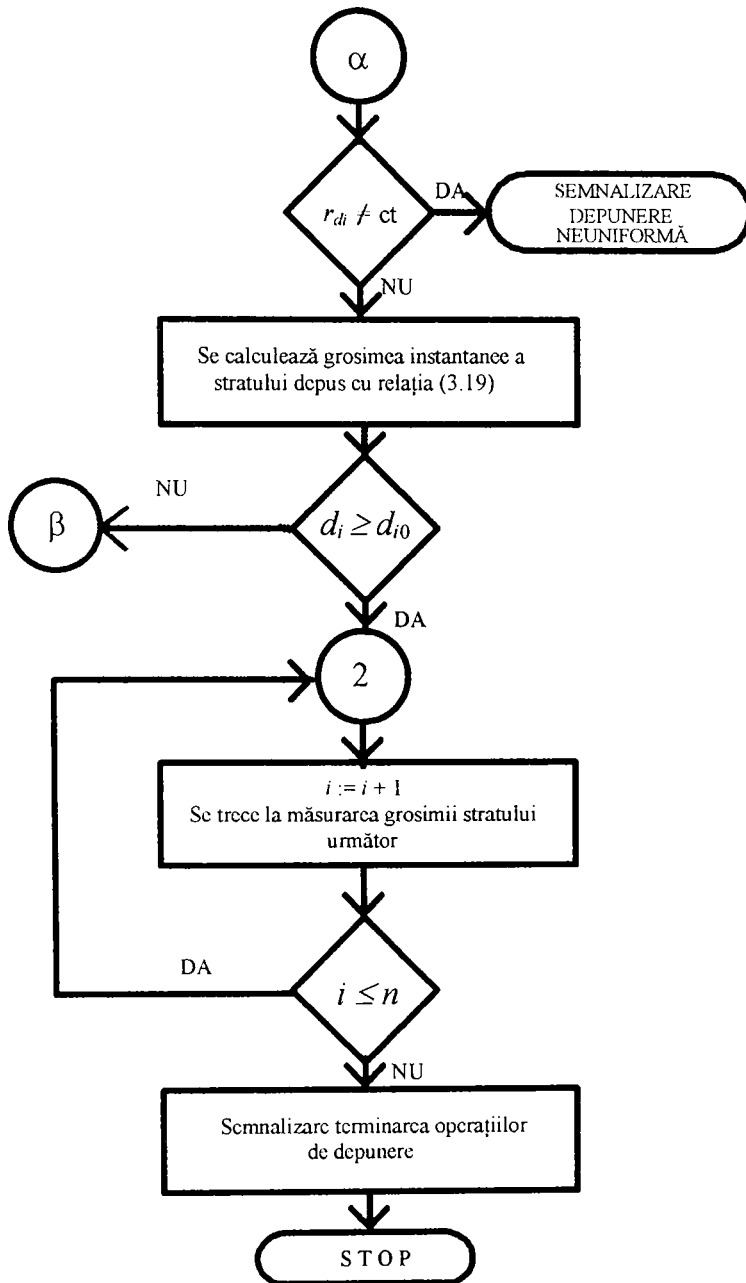


Fig.4.1.b. Ordinograma de funcționare a aparatului pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri.

Schema bloc principală a aparatului pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt este prezentată în Fig.4.2. Se constată că aparatul este organizat în jurul unui minicalculator specializat în efectuarea operațiilor aritmetice, care a fost programat să memoreze parametrii de proces și să implementeze relațiile (3.19) și (3.23). Pe lângă blocurile de măsurare numerică a frecvenței inițiale și a deviației de frecvență Δf , aparatul conține o memorie de program, care comandă fluxul informațional și executarea operațiilor de achiziție, prelucrare și transfer a datelor numerice și afișarea rezultatului măsurătorilor.

4.2. FUNCȚIONAREA APARATULUI DUPĂ SCHEMA BLOC

Aparatul pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri (Fig.4.2.) este conceput să funcționeze în două regimuri: MANUAL și AUTOMAT. Înainte de pornirea procesului de depunere prin acționarea comutatorului de funcționare în regim "MANUAL" se măsoară numeric frecvența inițială f_{0i} ($i=1..n$) cu ajutorul blocului MĂSURARE f_0 . Valoarea obținută rămâne memorată în acest bloc până la inițializarea procesului de depunere și este transferată în MINICALCULATOR prin intermediul blocurilor MĂSURARE Δf , CONTROL DATE și interfeței TTL/MOS. Se introduc prin TASTATURA aflată pe panoul frontal în ordine: parametrii traductorului: m_0 , r_d , d_q , S , ai materialului care se depune: ρ_i ; se prescriu grosimea finală d_{0i} și rata depunerii dorită r_{di} , ca și constantele de proporționalitate k_i calculate numeric pentru cele mai uzuale materiale din microelectronică (vezi ANEXA 1). Minicalculatorul este programat prin MEMORIA PROGRAM să efectueze calculul constantelor de proporționalitate K'_a, K'_d din relațiile (3.19) și (3.20) respectiv K''_a, K''_d din relațiile (3.22) și (3.23).

Trecerea aparatului în regim de funcționare AUTOMAT implică inițializarea procesului de depunere, de măsurare, calcul și afișare a frecvenței instantanee a traductorului f_i , a diferenței de frecvență $\Delta f_i = f_0 - f_i$, a grosimii momentane a stratului de d_i și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat r_{di} .

Întreaga succesiune a măsurărilor, operațiilor de calcul și memorare, precum și afișarea rezultatelor sunt comandate secvențial de MEMORIA PROGRAM care este adresată de la GENERATORUL DE ADRESE activat de impulsurile de tact furnizate de BAZA DE TIMP.

Valoarea inițială a frecvenței f_0 este încărcată în blocul MĂSURARE Δf și este decrementată pe durata unei perioade de măsurare, f_i , obținându-se astfel valoarea momentană a variației frecvenței oscilatorului de măsură Δf . Această valoare este transferată în minicalculator prin intermediul interfeței TTL/MOS, unde este înmulțită cu constanta de proporționalitate K'_d calculată anterior și aflată în memorie. În acest mod se obține valoarea momentană d_i a grosimii depuse care se compară cu valoarea prescrisă d_{0i} memorată în blocul PRESCRIERE d_0 , r_0 , Δt .

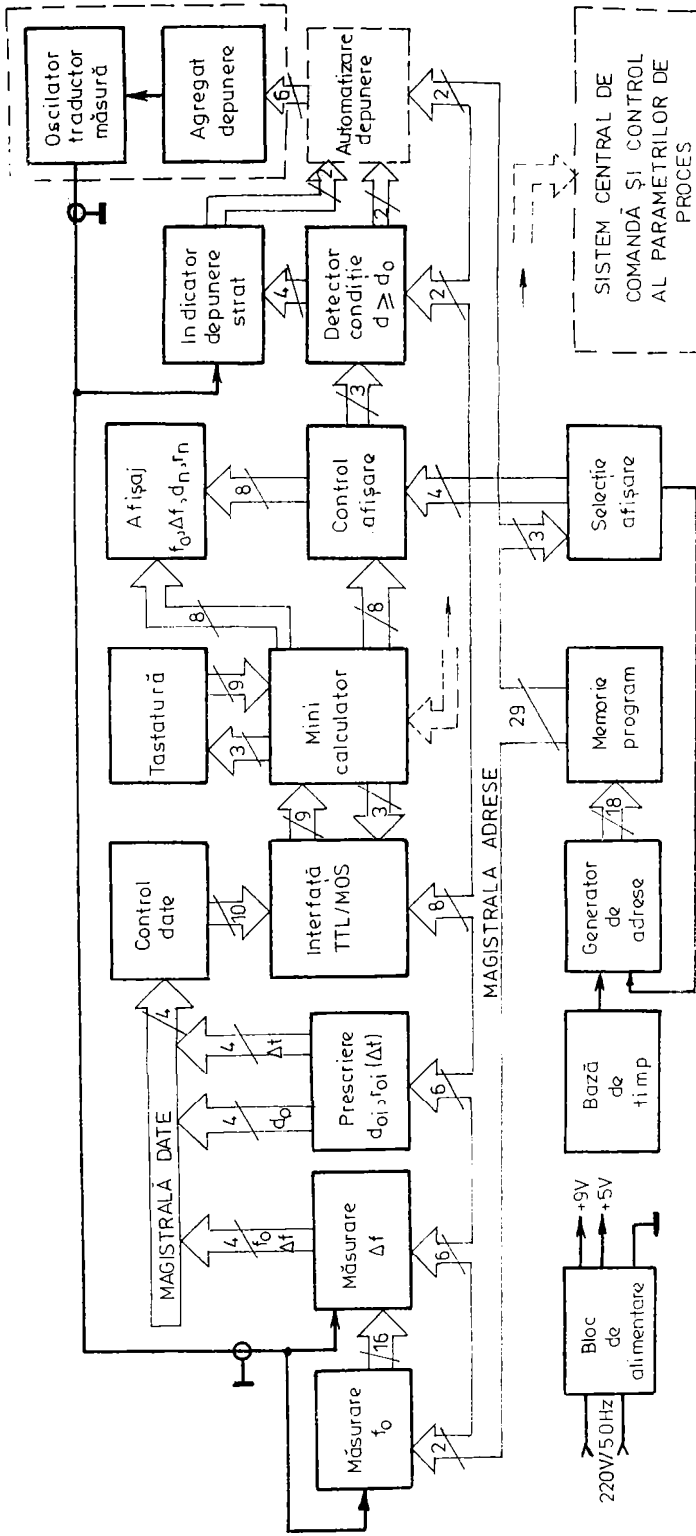


Fig. 4.2. Schema bloc de principiu a aparatului MGS 01

Dacă expresia :

$$\Delta d = d_i - d_{0i} \quad (4.1.)$$

este negativă, procesul de depunere continuă.

Oprirea depunerii se realizează când mărimea Δd devine nulă sau pozitivă, operația fiind asigurată de blocurile DETECTOR DE CONDIȚIE care acționează instalația de automatizare a depunerii.

Rata depunerii r_{di} se determină prin efectuarea a două măsurări succesive ale grosimii stratului depus la intervalul de timp $\Delta t = 1s$. Comparând ratele depunerilor la intervale de timp prestabilite prin program se constată calitatea depunerilor obținute. În cazul obținerii unor depuneri neuniforme ($r_d \neq \text{const.}$) prin intermediul blocului INDICATOR AL DEPUNERII STRAT se activează SISTEMUL CENTRAL DE COMANDĂ ȘI CONTROL AL PARAMETRILOR DE PROCES care comandă prin blocul de AUTOMATIZARE DEPUNERE reducerea curentului de încălzire al electrozilor. Rezultatele obținute din calcule (d_n , r_d) sau din măsurări directe (f_0 , f_i , Δf_i) pot fi afișate secvențial, sau se poate selecta direct de la panoul frontal numai parametrul dorit. Această facilitate este asigurată de blocurile CONTROL și SELECȚIE AFIȘARE, ceea ce permite o urmărire rapidă și sigură a procesului tehnologic.

Pentru măsurarea grosimii stratului următor, sistemul central de comandă și control al parametrilor de proces comandă aducerea aparatului în regim de funcționare MANUAL, și ștergerea memoriei minicalculatorului. După prescrierea noilor parametri prin tastatura de la panoul frontal, se inițializează un nou ciclu de măsurare și control a grosimii SS următor. Dacă numărul straturilor depuse este mare și grosimea totală depășește 999999Å are loc blocarea oscilatorului traductorului de măsurare. Blocul INDICATOR DEPUNERE avertizează încetarea controlului automat și se impune înlocuirea sau curățirea traductorului de cuarț după care se poate iniția o nouă operație de măsurare.

4.3. CARACTERISTICILE APARATULUI MGS 01

Aparatul pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt MGS 01, realizat după schema de principiu prezentată în Fig.4.2. se compune din traductorul grosime-frecvență și monitor-controlorul grosimii stratului depus și a vitezei de evaporare.

Traductorul de măsură prezentat în Fig.4.3. este format din traductorul propriuzis și sonda traductorului, constituie obiectul certificatului de inovator Nr.1789/1985 /23/.

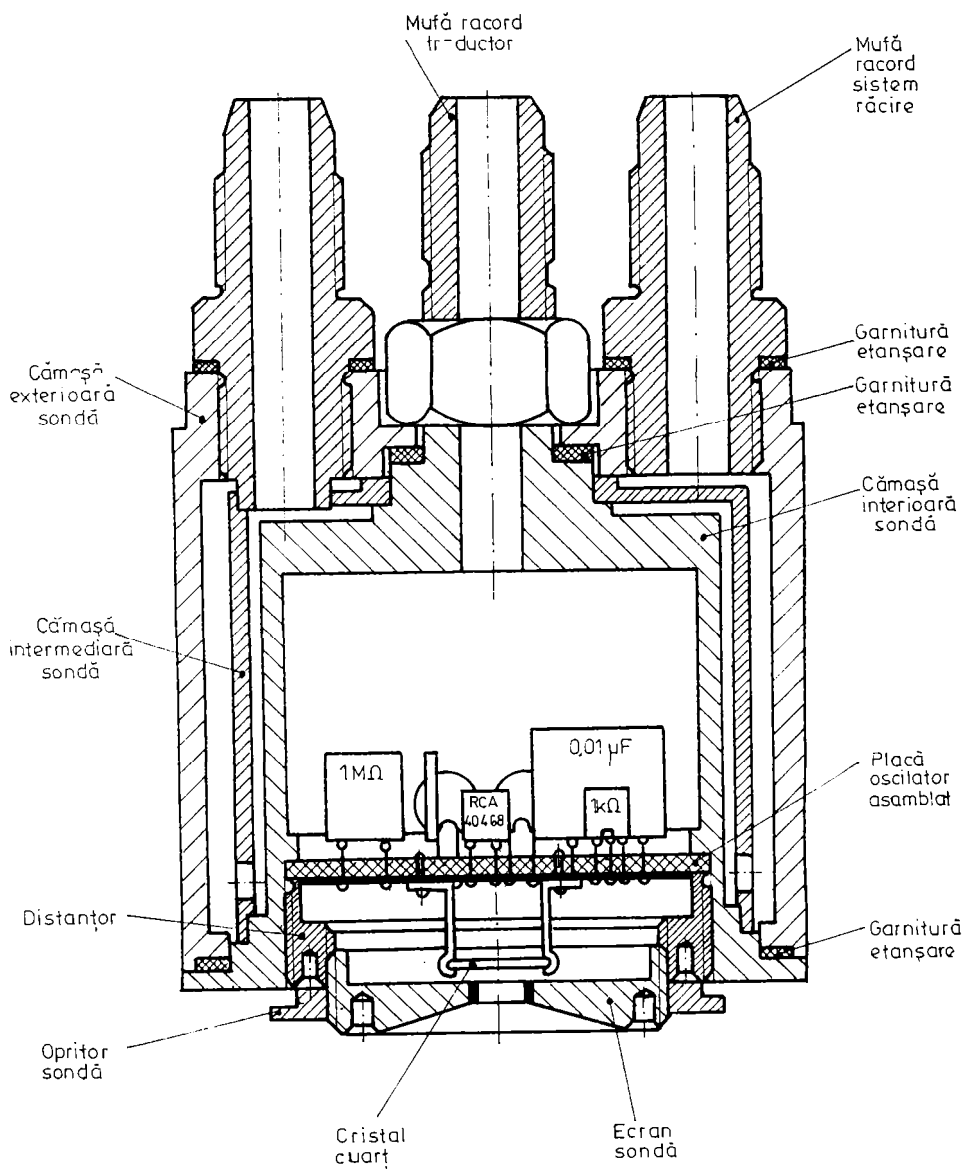


Fig.4.3. Schema traductorului grosime-frecvență

Traductorul propriuzis este un oscilator cu cristal de cuarț, tăietura AT, de mare stabilitate a frecvenței și amplitudinii oscilațiilor, ce oscilează neîncărcat pe frecvența de rezonanță $f_0=10$ MHz.

Schema electrică de principiu a traductorului este prezentată în Fig.4.4.

S-a conceput o variantă originală de oscilator tip PIERCE modificat, pentru a asigura stabilitatea frecvenței de oscilație cu modificarea tensiunii de alimentare, cu temperatura și cu toleranța componentelor pasive.

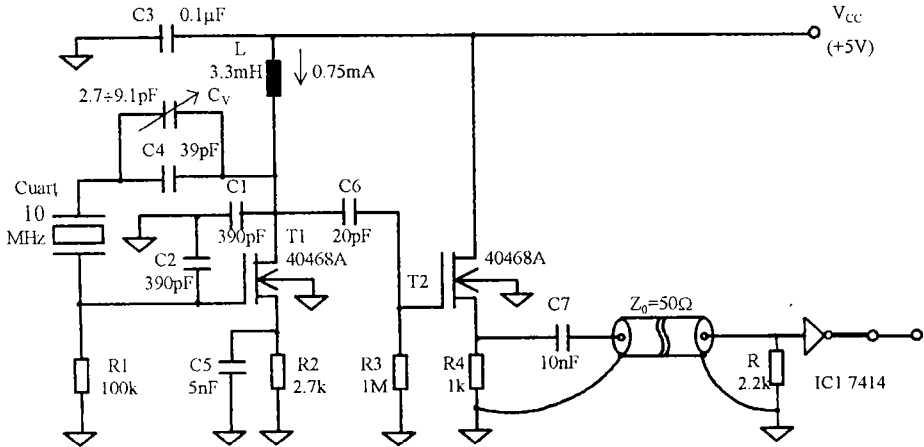


Fig.4.4. Schema electrică a oscilatorului traductorului grosime-frecvență.

Schema propusă prezintă următoarele îmbunătățiri:

- utilizează tranzistoarele MOSFET cu canal N inițial de calitate (RCA 40468A) cu capacități parazite reduse, controlabile tehnologic și cu un raport ridicat $r_{off}/r_{on} > 10^8$.
- aplică o reacție suplimentară prin $C1, C2$ pentru îmbunătățirea caracteristicii de frecvență prin neutrodinarea capacității parazite C_{gd} .
- asigură ajustarea frecvenței de oscilație la valoarea de 10MHz prin C_v , atunci când se schimbă cristalul de cuarț.
- evită încărcarea la ieșire a oscilatorului prin utilizarea unui repetor pe sursă.

Pentru atenuarea reflexiilor produse pe linii lungi s-a realizat semiadaptarea cu rezistorul $R=2,2$ k Ω , iar pentru creșterea marginii de zgomot s-a utilizat Triggerul Schmitt IC1 7414. Cristalul de cuarț al oscilatorului are masa $m_0=2,375$ g, densitatea $\rho_q=7,42$ g/cm³ și este accesibil pe o regiune delimitată având suprafața, $S=10$ mm², moleculelor de material, degajate prin procesul de evaporare termică sau pulverizare catodică în vid înalt.

Sonda traductorului reprezintă suportul mecanic în care se montează traductorul propriuzis, având și rolul de a asigura termostatarea oscilatorului. Sonda este realizată din alamă cromată, pentru a reflecta căldura radiată de evaporator, cu pereții dublii

pentru circulația apei necesare răcirii. Sonda este prevăzută cu trei mufe de racord etanșe, două pentru admisia și evacuarea apei de răcire și una pentru prelevarea semnalelor furnizate de traductor. Prin sistemul de reglare prevăzut, există posibilitatea modificării distanței dintre ecranul traductorului și cristalul de cuarț, ca și modificarea poziției traductorului față de sursa de evaporare. În Fig.4.5. se prezintă o fotografie a traductorului realizat, care echează o instalație de evaporare termică în vid înalt tip AV 100/AV 500.

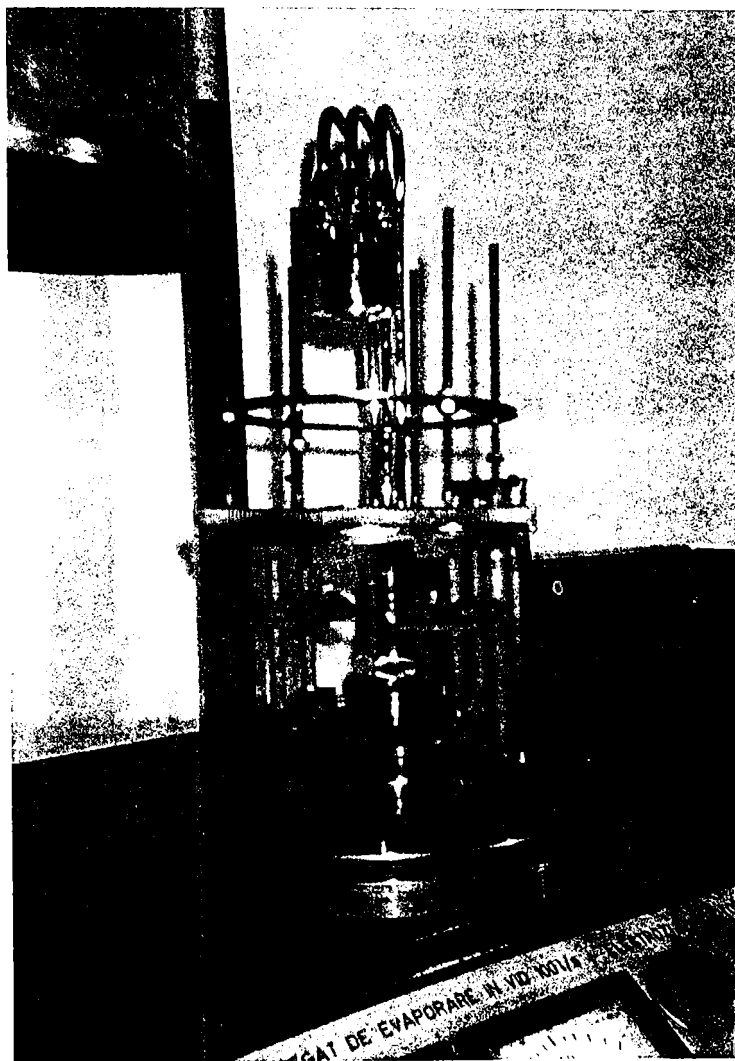


Fig.4.5. Fotografia traductorului de măsură montat pe instalația de evaporare termică AV 100/AV 500.

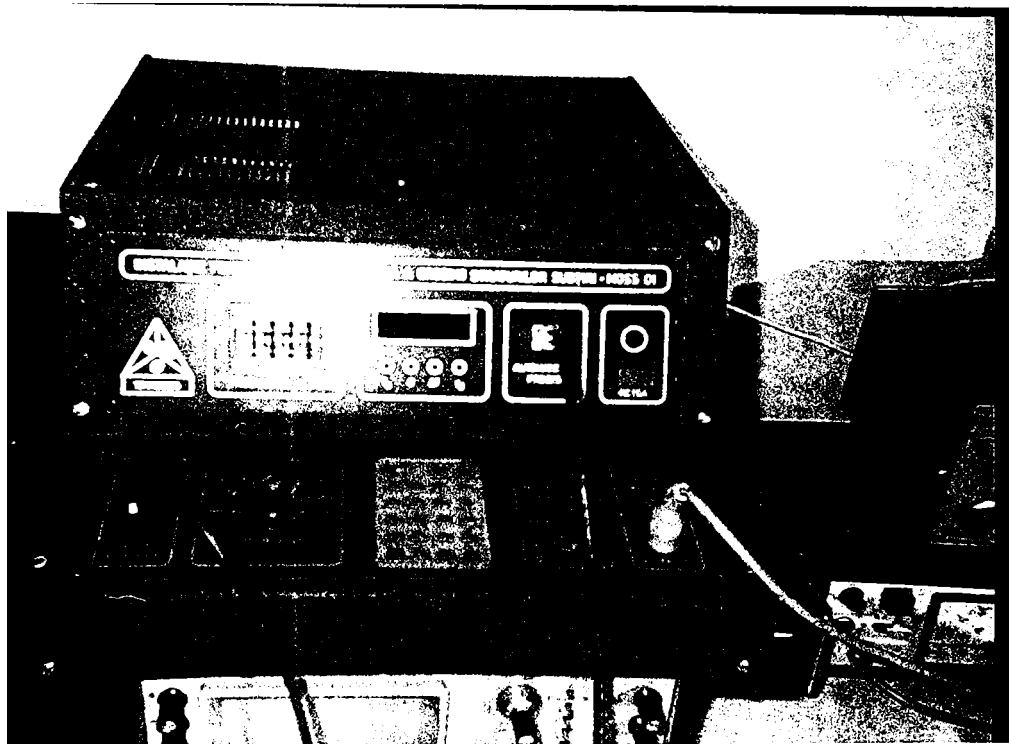


Fig.4.6. Fotografia aparatului MGS 01 conectat la instalația de evaporare termică AV 100/AV 500.

Aparatul pentru măsurarea grosimii straturilor subțiri obținute prin depuneri succesive în instalații industriale de vid înalt, are o construcție modulară, este ușor de manipulat și prezintă un desing plăcut. Figura 4.6. prezintă o fotografie a acestui aparat conectat la instalația de evaporare termică AV 100/AV 500.

Se constată că sunt disponibile pe panoul frontal programatorul grosimii stratului depus și a ratei depunerii, tastatura pentru introducerea parametrilor de proces, afișaj alfanumeric cu cristale lichide având opt celule de afișare cu ajutorul căruia se poate afișa grosimea, viteza de depunere, frecvența și deviația de frecvență, secvențial, sau la cerere numai parametrul dorit. În acest mod s-a realizat o economie de circuite și celule de afișare.

Tot pe panoul frontal sunt disponibile indicatoare luminoase pentru avaria surselor de alimentare, funcționarea traductorului de măsură, viteza de evaporare neuniformă, terminarea procesului de depunere, precum și pentru activarea blocului de autotest.

Blocurile funcționale ale aparatului MGS 01 sunt organizate modular și implementate pe plăci dublu stratificate cu găuri metalizate format EUROCARD (100mm x 160 mm). Magistralele de interconectare a modulelor la fundul de sertar sunt compatibile cu standardele de magistrală STD-Z80. Această tehnologie asigură o

fiabilitate ridicată, o testabilitate facilă și implicit o depanare rapidă. Imunitatea ridicată la perturbații obținută prin ecranări, gardări, compartimentări și aplicarea unor tehnici speciale de transmitere și recepție a datelor numerice (party line, optoizolatori, etc.) îi creează posibilitatea de a fi utilizat atât în aplicații speciale, cât și industriale. În tabelul 4.1. sunt prezentate sintetic principalele caracteristici ale aparatului MGS 01. Menționăm că soluția prezentată constituie obiectul brevetului de inventator Nr.93890/1989 /26/.

Tabelul 4.1. Caracteristicile principale ale aparatului MGS 01.

CARACTERISTICI	DOMENIUL DE MĂSURĂ	REZOLUȚIA
Grosimea depunerilor	0 - 999999 Å	1Å de la 0 - 9999 Å 10Å de la 10 - 99,9 KÅ 100Å de la 100 - 999,9 KÅ
Rata depunerii	0 - 999999 Å/s	2 - 10 Å/s
Domeniul de frecvență	9 - 10 MHz	1 Hz
Densitatea materialelor măsurate	0 - 999999 g/cm ³	0,1 g/cm ³
Caracteristicile traductorului de măsură	<ul style="list-style-type: none"> - Masa $m_0 = 2,375$ g - Densitatea $r_q = 7,42$ g/cm³ - Frecvența de rezonanță $f_0 = 10$ MHz - Montură termostată și răcită cu apă. 	
Afișaj numeric pentru parametrii, control și funcții auxiliare	<ul style="list-style-type: none"> - grosimea stratului depus (Å) - rata depunerii (Å/s) - frecvența instantanee (Hz) - devierea de frecvență (Hz) - indicator luminos rețea - indicator luminos avarie surse de alimentare - indicator luminos depunere strat - indicator luminos intermitent depunere neuniformă - semnale de comandă TTL pentru automatizarea instalației de depunere 	
Alimentare	220 V/50 Hz	
Puterea consumată	50 W	
Dimensiuni modular	<ul style="list-style-type: none"> - adâncime 480 mm - lățime 400 mm - înălțime 210 mm - greutate 3,6 Kg 	

4.4. CONCLUZII

În acest capitol a fost prezentată construcția și funcționarea unui aparat complex pentru măsurarea și controlul în timp real a grosimii straturilor subțiri de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt. Se poate constata că aparatul construit reprezintă o soluție tehnică modernă, flexibilă și fiabilă. Utilizarea minicalculatorului “on chip”, tip MST 8014NSDIL 28 pini, realizat de National Semiconductor SVA, a permis simplificarea schemei hardware și implicit reducerea dimensiunilor de gabarit și a prețului de cost. Aparatul MGS 01 asigură o precizie ridicată a parametrilor măsurați și permite controlul automat al parametrilor de proces.

Dacă se compară caracteristicile aparatului MGS 01 cu caracteristicile raportate în literatură /10,61,62,103,105/ de firme consacrate cum ar fi: INFICON, BALZERS, VARIAN care furnizează instalații pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri, se remarcă atât caracteristici comune, dar și caracteristici specifice.

Considerând ca referință aparatele XMSL-3 (10), QRS 101 (61,62) și VA 100-104 (103,105) și raportând caracteristicile lor la caracteristicile aparatului MGS 01, sunt relevante următoarele caracteristici comune:

- toate aparatele utilizează pentru măsurarea grosimii SS și a ratei depunerilor un traductor din cuarț cu tăietură AT.
- timpul de măsurare și variația de frecvență a traductorului sunt comparabile.
- toate aparatele se pretează la măsurarea grosimii SS utilizate curent în microelectronică, atât metalice cât și dielectrice sau semiconductoare.
- densitățile materialelor a căror grosime se măsoară au același domeniu de variație.
- toate aparatele asigură același domeniu de măsurare a grosimii SS și aceeași gamă a ratei depunerilor.

Pe lângă aceste caracteristici comune, aparatul MGS 01 oferă următoarele facilități suplimentare:

- permite măsurarea și controlul grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic, utilizând un singur traductor, spre deosebire de aparatele menționate mai sus care solicită utilizarea unui traductor separat pentru determinarea grosimii fiecărui strat depus.
- asigură o frecvență de rezonanță mai mare (10MHz) pentru oscilatorul traductorului de măsură și implicit o rezoluție și o precizie mai ridicată.
- este ușor de manipulat și adaptat la oricare din instalațiile industriale de obținere a straturilor subțiri utilizate în microelectronică.
- utilizând circuite specializate, are o schemă hardware simplă, de mare fiabilitate, la un preț scăzut.

Aparatul MGS 01, având o construcție modulară, imunitate ridicată la perturbații și un consum redus, poate fi utilizat atât în aplicații speciale de cercetare cât și industriale, în care se urmărește măsurarea și controlul cu precizie a grosimii straturilor subțiri.

CAPITOLUL 5

SISTEM AUTOMAT DE CONDUCERE, COMANDĂ ȘI CONTROL A PARAMETRILOR DE PROCES AI UNEI INSTALAȚII INDUSTRIALE DE OBTINERE A STRATURILOR SUBȚIRI, PRIN DEPUNERI SUCESIVE ÎN VID ÎNALT

În producția de serie a straturilor subțiri utilizate în microelectronică, pe lângă măsurarea grosimii și a vitezei de evaporare, se impune realizarea unor instalații complexe, de conducere, comandă și control în timp real a parametrilor de proces. Este necesară astfel elaborarea unor echipamente automate care să permită controlul operației de degazare, realizarea vidului înalt, încălzirea materialului până la temperatura de evaporare, deschiderea obturatorului plasat în calea fasciculului atomo-molecular, rotirea substraturilor deasupra evaporatorului etc. Toate aceste operații, executate conform unui program prestabilit, trebuie corelate cu măsurarea grosimii și controlul vitezei de condensare a moleculelor pe substrat, pentru obținerea straturilor subțiri uniforme cu grosimi prestabilite. Acest capitol tratează concepția, funcționarea și realizarea unui sistem electronic automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces, destinat re tehnologizării instalațiilor industriale de obținere a straturilor subțiri prin evaporare termică în vid înalt tip, AV/AE 100-500.

5.1. CONFIGURAȚIA GENERALĂ A SISTEMULUI AUTOMAT DE CONDUCERE, COMANDĂ ȘI CONTROL A PARAMETRILOR DE PROCES

Pentru a facilita înțelegerea construcției și funcționării sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces, în Anexa 2 a lucrării, se prezintă schemele bloc de principiu și ordinoamele de operare, a celor două agregate AV 100/500; AE 100/500 din componența instalației industriale de depunere a straturilor subțiri, prin evaporare termică în vid înalt, tip AV/AE 100/500. Din analiza ordinoamelor prezentate în Fig.A.2.2. și Fig.A.2.4. rezultă că sistemul

automat de monitorizare a parametrilor de proces, trebuie să îndeplinească două funcțiuni principale:

- a) **controlează** următorii parametri de proces: presiunea în incinta vidată; temperatura de încălzire a materialului; presiunea în circuitul apei de răcire; grosimea stratului depus și viteza de condensare a moleculelor pe substrat
- b) **comandă** alimentarea cu energie electrică a agregatelor de evaporare și vid înalt, AV/AE 100/500, modificarea curentului de încălzire a electrozilor, deschiderea sau închiderea obturatorului plasat pe direcția fascicului atomo-molecular și a robinetilor de vid preliminar sau înalt, pornirea și oprirea sistemului de rotire a plachetelor, oprirea procesului de depunere și/sau inițializarea unui nou proces tehnologic.

Pe lângă aceste funcțiuni principale, echipamentul automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces, trebuie să semnalizeze optic și acustic, următoarele fenomene:

- întreruperea accidentală a alimentării cu energie electrică
- întreruperea circuitului de răcire cu apă
- depășirea grosimii prescrise
- neuniformitatea stratului depus
- defectarea traductorului de măsurare a grosimii și a ratei depunerii
- inițializarea unui nou proces tehnologic

Dat fiind numărul mare al parametrilor de proces, care trebuie controlați cât și a facilităților solicitate pentru comandă acționare și semnalizare, se impune realizarea sistemului automat de conducere, comandă și control al parametrilor de proces din instalațiile industriale de obținere a straturilor subțiri, cu ajutorul unui microcontroler evoluat, care face parte din categoria circuitelor integrate VLSI, specializate în aplicații industriale

5.2. SCHEMA BLOC ȘI FUNCȚIONAREA SISTEMULUI AUTOMAT DE CONDUCERE A PROCESULUI TEHNOLOGIC, COMANDĂ ȘI CONTROL A PARAMETRILOR DE PROCES

În Fig.5.1. este prezentată schema bloc de principiu concepută pentru realizarea sistemului automat de conducere ,comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații industriale de depunere a straturilor subțiri, prin evaporare termică în vid înalt. Schema conține: instalația tehnologică din care se culeg parametrii de proces (temperatură, presiune, grosime strat, rata depunerii), sistemul de monitorizare, realizat în jurul microcontrolerului și circuitele aferente de comandă și acționare (motoare electrovalve, obturatoare, electrozi, sistemul de rotire plachete și acționare clopot).

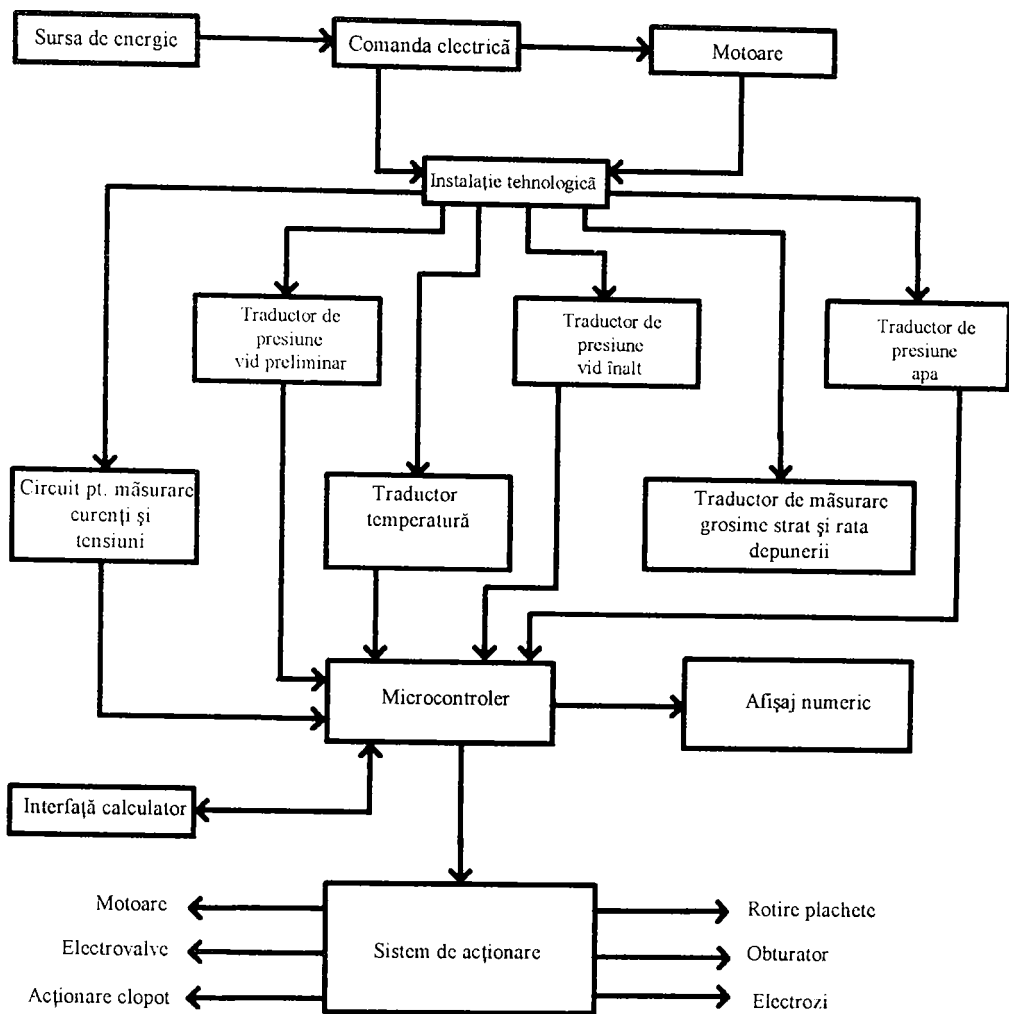


Fig.5.1. Schema bloc a sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces din instalațiile industriale de evaporare termică în vid înalt.

Funcționarea după schema bloc, operațiile de achiziție, prelucrare și control ca și afișarea numerică a rezultatelor măsurărilor, precum și succesiunea normală de operare, au fost sintetizate în ordinograma prezentată în Fig.5.2.

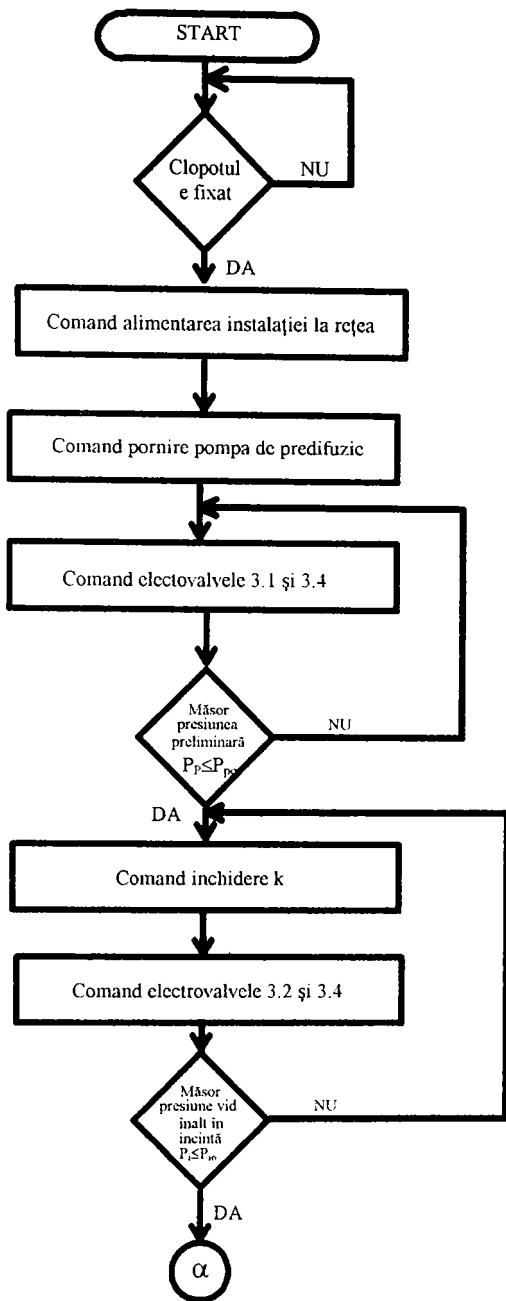


Fig.5.2.a Ordinograma de funcționare a sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces în instalațiile industriale de vid înalt.

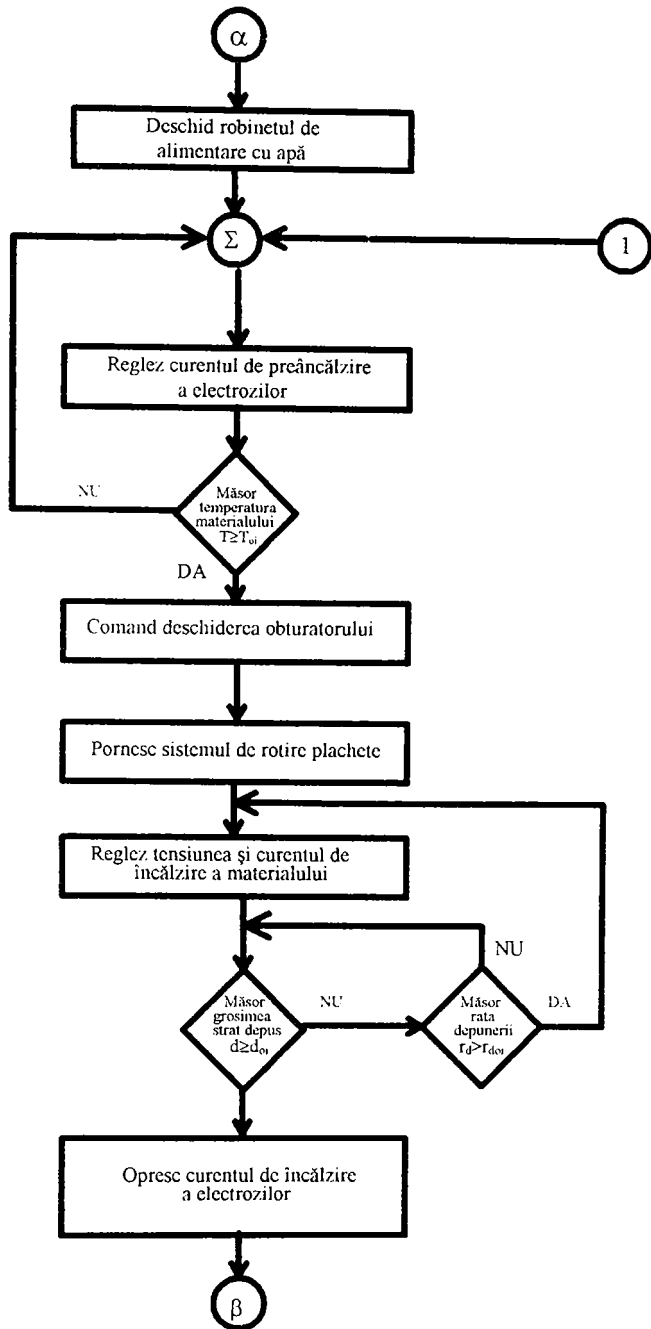


Fig.5.2.b Ordinograma de funcționare a sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces în instalațiile industriale de vid înalt.

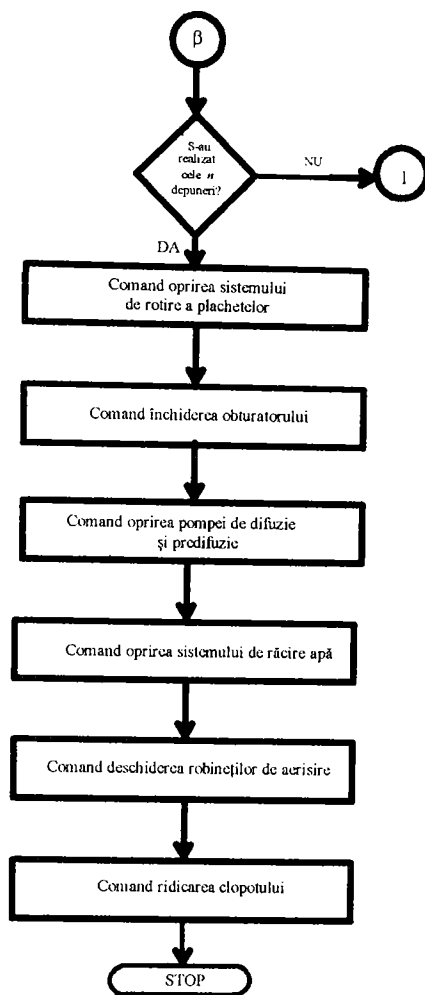


Fig.5.2.c Ordinograma de funcționare a sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces în instalațiile industriale de vid înalt

5.3. SCHEMA DE PRINCIPIU A SISTEMULUI AUTOMAT DE CONDUCERE, COMANDĂ ȘI CONTROL, A PARAMETRILOR DE PROCES

Sistemul automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații de depunere prin evaporare termică în vid înalt este constituit în jurul microcontrolerului de fabricație SIEMENS tip SAB 80C535. Acest circuit integrat

poate fi considerat ca o dezvoltare a microcontrolerului INTEL 80C51 la care cele mai importante segmente adăugate sunt: 8 canale de date analogice multiplexate, CAN pe 8 biți, șase porturi de I/O cvasi-bidirecționale, 256 biți RAM intern și un numărător/temporizator suplimentar pe 16 biți.

Schema bloc de principiu, conexiunile la capsulă, modurile de adresare ale memoriei, funcțiile speciale ale regisrilor aritmetici, de control și de interfațare cu unitatea centrală, ca și funcțiile alternative ale porturilor de I/O ale microcontrolerului SAB 80C535 sunt prezentate în Anexa 3 a lucrării.

Schemele electrice de principiu ale echipamentului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații industriale de evaporare termică în vid înalt sunt prezentate în Fig.5.3.a...c și Fig.5.4.a.b.

Pornind de la disponibilitățile actuale în materie de circuite specializate din familia VLSI, s-a optat pentru realizarea sistemului automat de conducere a procesului tehnologic sub forma unei structuri modulare, organizată în jurul microcontrolerului SAB 80C535. Acest circuit integrat este compatibil cu microcontrolerele din familia 8051, în ceea ce privește setul de instrucțiuni, interfațările, ca și funcțiile alternative.

În plus, microcontrolerul SAB 80C535 conține suplimentar 128 bytes RAM intern ceea ce ridică capacitatea totală a memoriei interne la 256 bytes RAM. Un numărător/temporizator suplimentar pe 16 biți cu facilități de prescalare, reîncărcare, "achiziție și comparare" a fost adăugat celor două existente la 8051, ca și un watch-dog pe 16 biți, deosebit de util în faza de depanare a softului. Îmbunătățiri importante se pot constata și la partea de intrare/ieșire: un convertor integrat analog/numeric pe 8 biți, cu surse de referințe programabile intern și opt intrări analogice multiplexate, două porturi I/O cvasi-bidirecționale și o ieșire de clock programabilă. Structura de întreruperi este considerabil mai puternică, programatorul având acum la dispoziție 12 vectori și 4 niveluri programabile de întrerupere.

Unitatea aritmetică dispune de instrucțiuni binare și în cod BCD, iar unitatea logică de o gamă largă de operații executate pe bit. Majoritatea instrucțiunilor ocupă un octet sau doi, rezultând astfel o utilizare eficientă a memoriei. Mai precis, 44% din instrucțiuni au o lungime de 1 byte, 41% de 2 bytes și numai 15% ocupă 3 bytes. Ca o consecință imediată, viteza de procesare este mărită. La o frecvență a tactului de 12MHz, 58% din instrucțiuni vor fi executate într-o microsecundă, iar operațiile de înmulțire și împărțire pe 8 biți, vor necesita numai 4μs.

Aceste facilități oferite de microcontrolerul SAB 80C535 au permis simplificarea hardului sistemului, reducerea prețului de cost și obținerea unei structuri flexibile de mare fiabilitate.

Sistemul este organizat pe două plăci format EUROCARD. Pe prima placă (Fig.5.3.a) pe lângă unitatea centrală realizată cu microcontrolerul SAB 80C535 se mai află: memoria EPROM de 8 kbytes tip 27C64, memoria de date SRAM având capacitatea de 32 kbytes tip 62256, selecția afișajului LCD1 cu circuitul U6A tip 74HC5139 și U4 tip 74HCT251, iar selecția tastaturii 4×4 se realizează cu circuitul U6B tip 74HCT139 și U10 tip 74HC244.

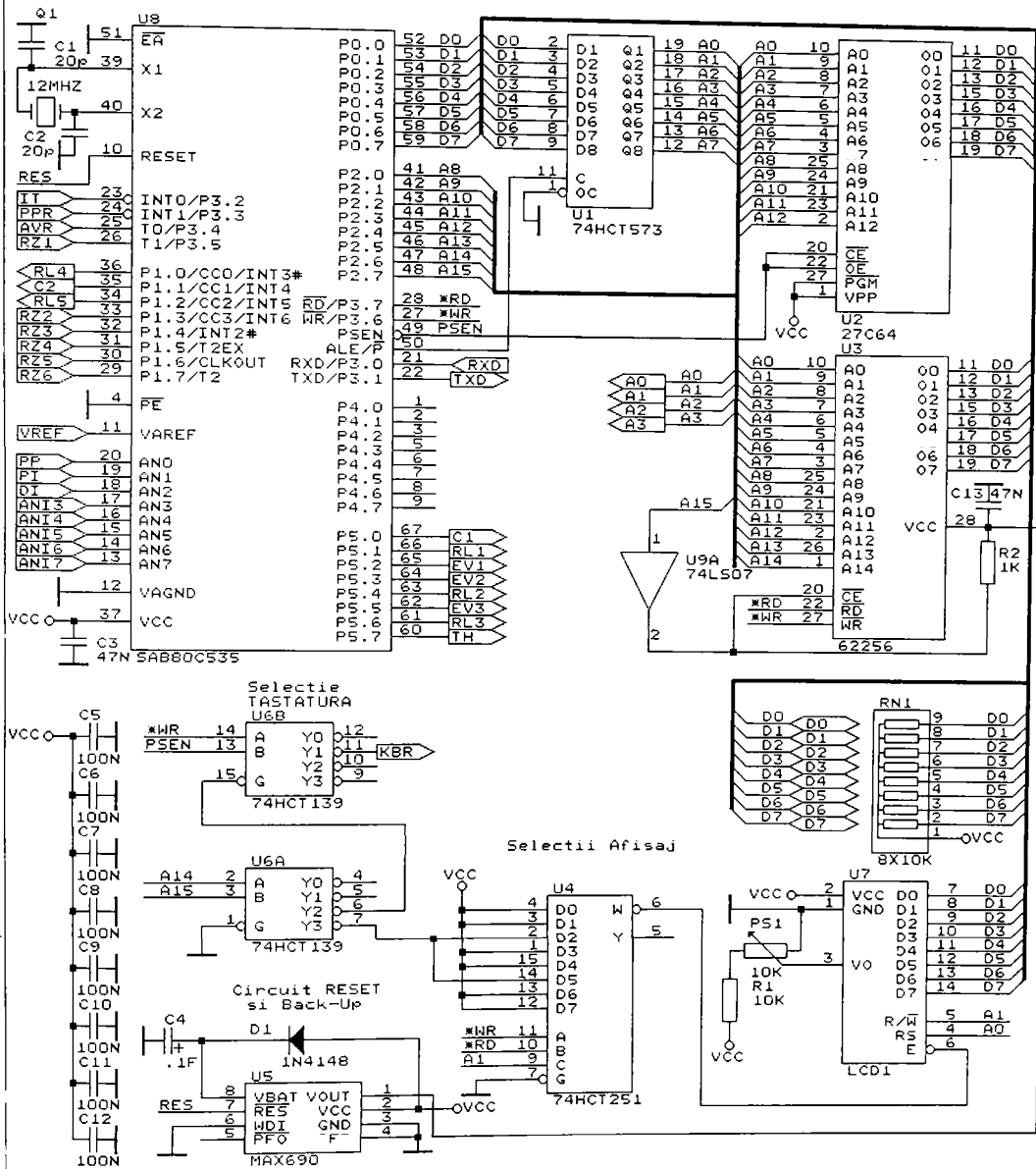


Fig. 5.3.a.

Schema electrica a microsistemului
si a dispozitivului de afisare

UNIVERSITATEA POLITEHNICA IIMISOARA		
PLACA 1		
Title	Microsistem, Afisaj	
Size	Document Number	REV
A	535/01	
Date:	December 22, 1996	Sheet 1 of 5

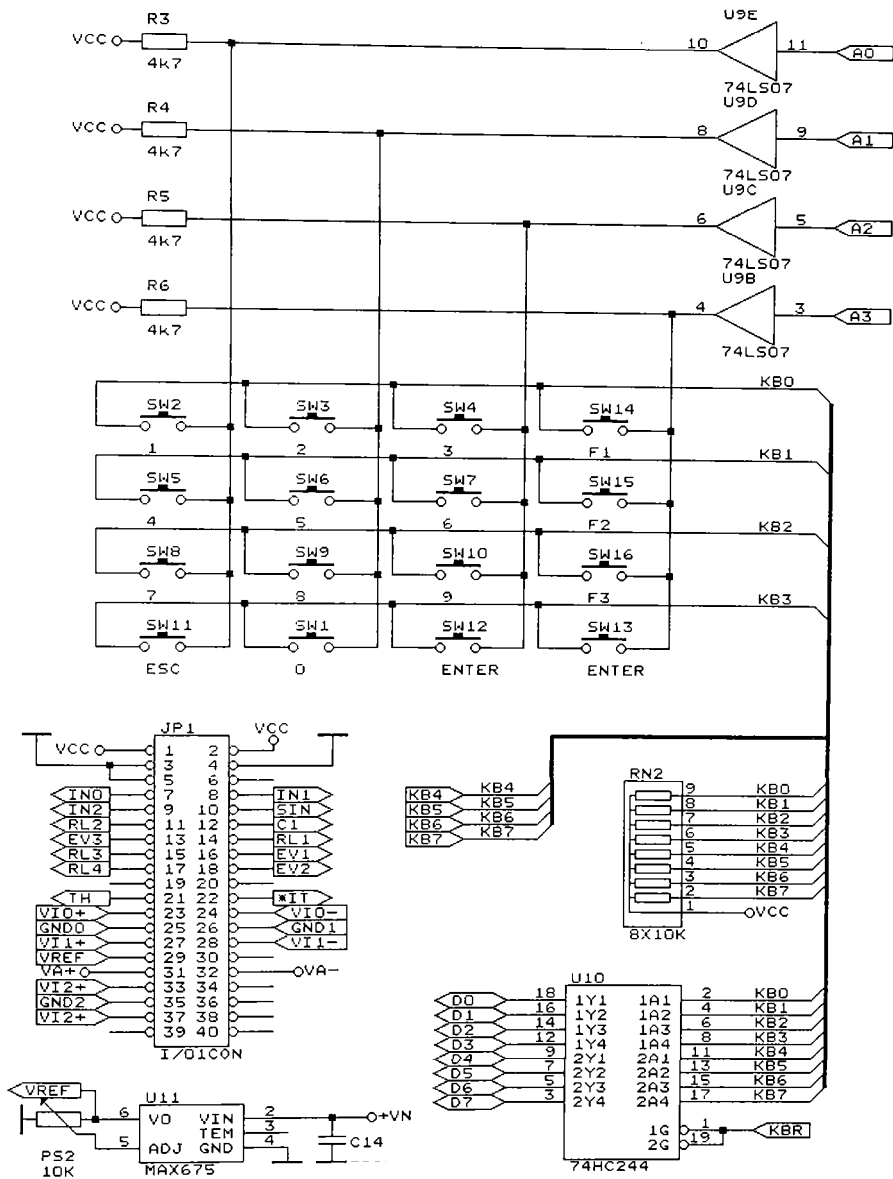


Fig. 5.3.b.

Schema electrica a tastaturii
si a elementelor de conectica

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMISOARA	
PLACA 1	
Title	Tastatura, Conectica
Size	Document Number
A	535/1
Date:	December 22, 1996 Sheet 2 of

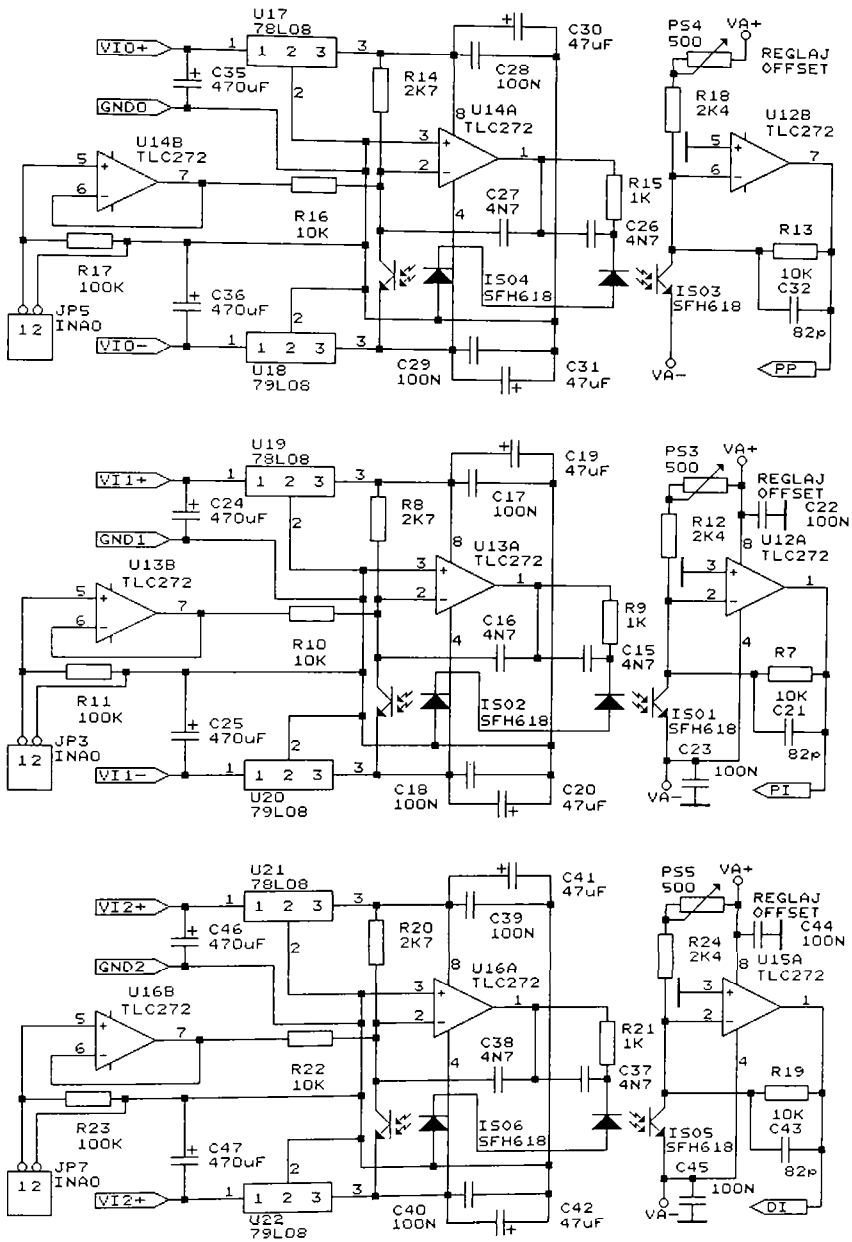


Fig. 5.3.c.

Schema electrica a amplificatoarelor
optoizolatoare si a drivere-lor de atac

UNIVERSITATEA POLITEHNICA IIMISOARA	
PLACA 1	
Title	Amplificatoare Optoizolate
Size	Document Number
A	535/03
Date:	December 22, 1996 Sheet 3 of

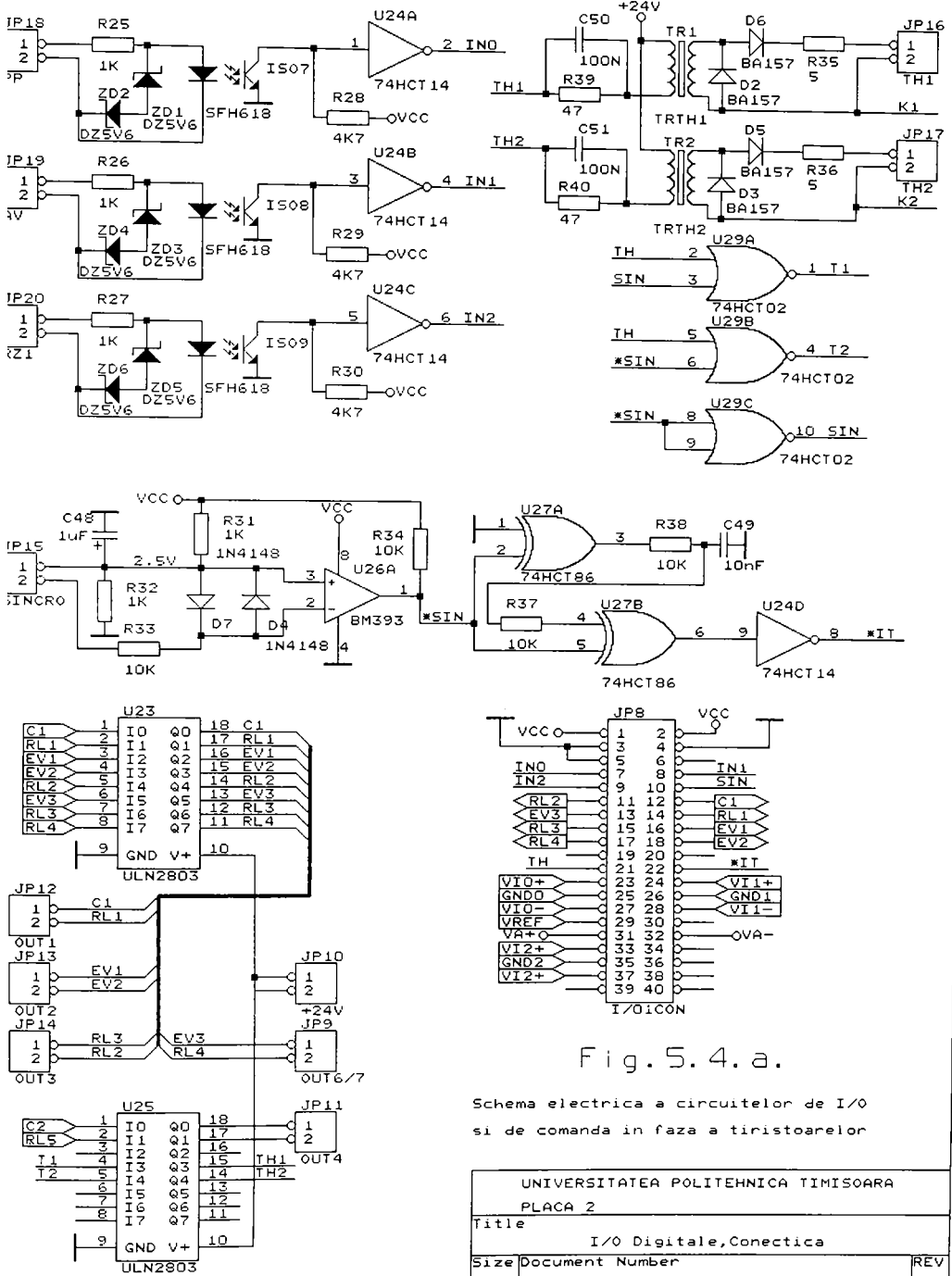


Fig. 5.4. a.

Schema electrica a circuitelor de I/O si de comanda in faza a tiristoarelor

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMISOARA	
PLACA 2	
Title I/O Digitale, Conectica	
Size Document Number	REV
A	535/04
Date: December 22, 1996	Sheet 4 of 5

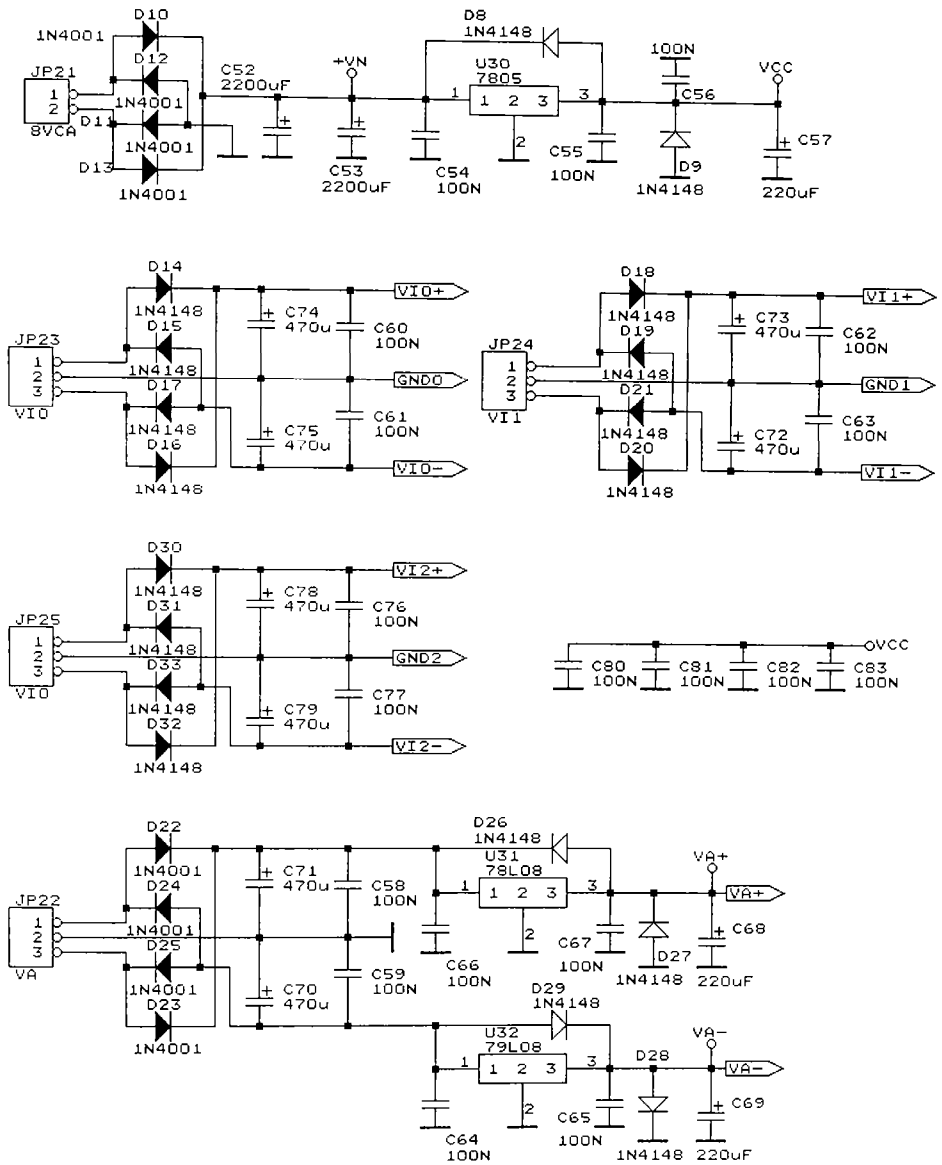


Fig. 5.4. b.

Schema electrica a surselor de alimentare

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMISOARA	
PLACA 2	
Title	Alimentare
Size	Document Number
A	535/05
Date:	December 22, 1996 Sheet 5 of

Circuitul de RESET utilizează integratul specializat U5 tip MAX 690, care mai îndeplinește împreună cu condensatorul C4 și funcția de asigurare a tensiunii de “Back-up” pentru memoria SRAM. Referința de tensiune pentru convertorul analog-numeric este asigurată de circuitul U11 tip MAX 675.

Tot pe prima placă (Fig.5.3.c) mai sunt dispuse trei amplificatoare optoizolatoare realizate cu circuitele specializate U12÷U16 tip TLC 272 cu amplificare unitară și optocuploarele de mare sensibilitate și precizie ridicată, IS01-IS06 tip SFH 618. Conectarea între cele două plăci este realizată cu un conector standard SPI având 40×2 pini.

Placa a doua (Fig.5.4.a,b) conține circuitele care conectează microsistemul, la elementele de acționare, dispuse în instalația de depunere a straturilor subțiri prin evaporare termică în vid înalt.

Pe această placă sunt dispuse următoarele circuite:

- circuitele de intrare digitale, izolate galvanic cu optoizolatoarele SFH 618 (IS07-IS09) pentru protecția sistemului față de potențialele ridicate existente în instalația de depunere
- sistemul de sincronizare realizat cu circuitele U24÷U27, destinat formării semnalelor de întrerupere, necesare deschiderii în fază a tiristoarelor de comandă
- driverele specializate în conexiune Darlington și cu ieșiri open collector, tip VLN 2803, destinate comenzii releelor și electrovalvelor având capacitatea de curent 500mA la o tensiune maximă de 35V
- circuitele de atac în față a tiristoarelor realizată cu două celule din U25 tip VLN 2803. Ieșirile acestor circuite, având ca sarcină transformatoarele TR1, TR2, comandă prin intermediul detectoarelor D2÷D6, grilele tiristoarelor din variatoarele de tensiune.
- semnalele de comandă a tiristoarelor TH sunt multiplexate cu semnalul sincron cu rețeaua SIN (respectiv negatul său /SIN) pentru a forma trenurile de impulsuri cu perioada de 100μs necesare deschiderii sigure a tiristoarelor
- sursele de alimentare (Fig.5.4.b) care generează tensiunile de alimentare stabilizate necesare (+5V, ±8V) și tensiunile de alimentare nestabilizate necesare amplificatoarelor optoizolatoare realizate cu U30÷U32

Sistemul de conducere, comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații de depunere prin evaporare termică în vid înalt a fost realizat fizic pe două plăci standard tip EUROCARD, prin tehnologii substructive dublu stratificate cu găuri metalizate. Dispunerea componentelor pe plăci și interconectarea între ele este prezentată în Anexa 4 a lucrării.

5.4. PROGRAMUL “CONDUCERE, COMANDĂ ȘI CONTROL”

În vederea elaborării softului sistemului trebuie precizate elementele programabile de intrare și organizarea porturilor de intrare-ieșire ale unității centrale, realizate cu microcontrolerul SAB 80C535 (Tabelul 5.1.)

A. ELEMENTE PROGRAMABILE DE INTRARE

n	Numărul de straturi 1÷16
d _n	Grosimea stratului n 0÷5V (0÷1μm)

B. INTRĂRI ANALOGICE

AN0	Presiune P _p 0÷5V; P _{op} = 1.25V - vid preliminar
AN1	Presiune P _i 0÷5V; P _{oi} = 2.5V - vid înalt
AN2	Grosime strat “d _i ” - programabili 0÷5V (0÷1μm)

C. INTRĂRI DIGITALE

P3.2	Semnal sincronizare rețea
P3.3	Pornire proces tehnologic
P3.4	Oprire circuite de forță proces

D. IEȘIRI DIGITALE OPEN COLECTOR

P5.0	C1 - Contactor rețea
P5.1	RL1 - Releu pompă vid preliminar
P5.2	EV1 - Electrovalvă robinet vid preliminar
P5.3	EV2 - Electrovalvă robinet vas tampon
P5.4	RL2 - Releu pompă difuzie
P5.5	EV3 - Electrovalvă rotire substraturi
P5.6	RL2 - Releu degazare substrate
P5.7	TH - Atac tiristoare comandă evaporator
P1.0	RL4 - Releu acționare obturator
P1.1	C2 - Contactor electrozi evaporator
P1.2	RL5 - Releu comandă instalație măsurare grosime

Tabelul 5.1. Elementele programabile și organizarea porturilor de intrare-ieșire

Principalele operații de achiziție, prelucrare, comandă și control a parametrilor de proces pe care trebuie să le execute sistemul automat de monitorizare a unei instalații industriale de depunere a straturilor subțiri prin evaporare termică în vid înalt, sunt sintetizate în ordinograma programului prezentată în Fig.5.5.

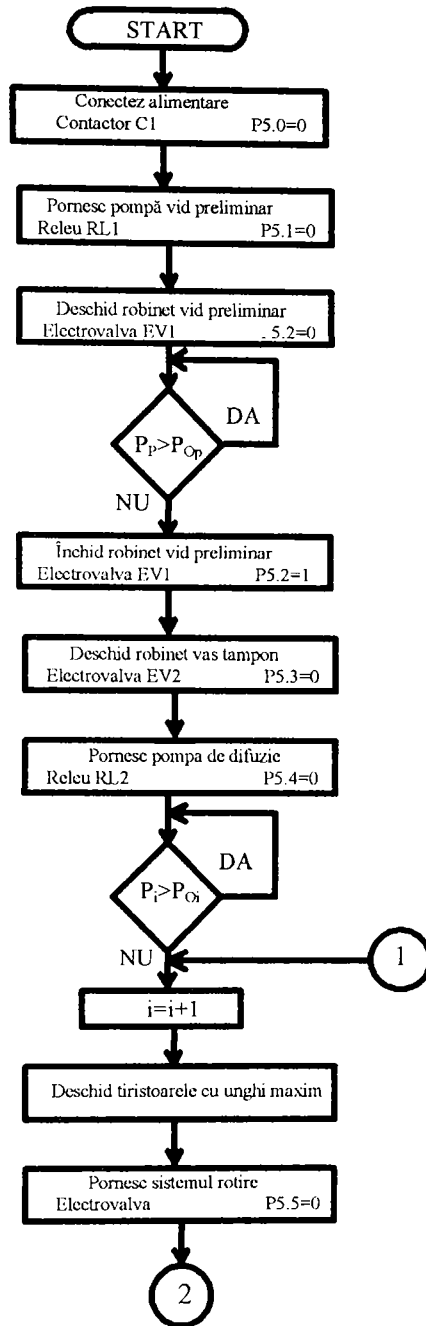


Fig.5.5.a. Ordinograma programului

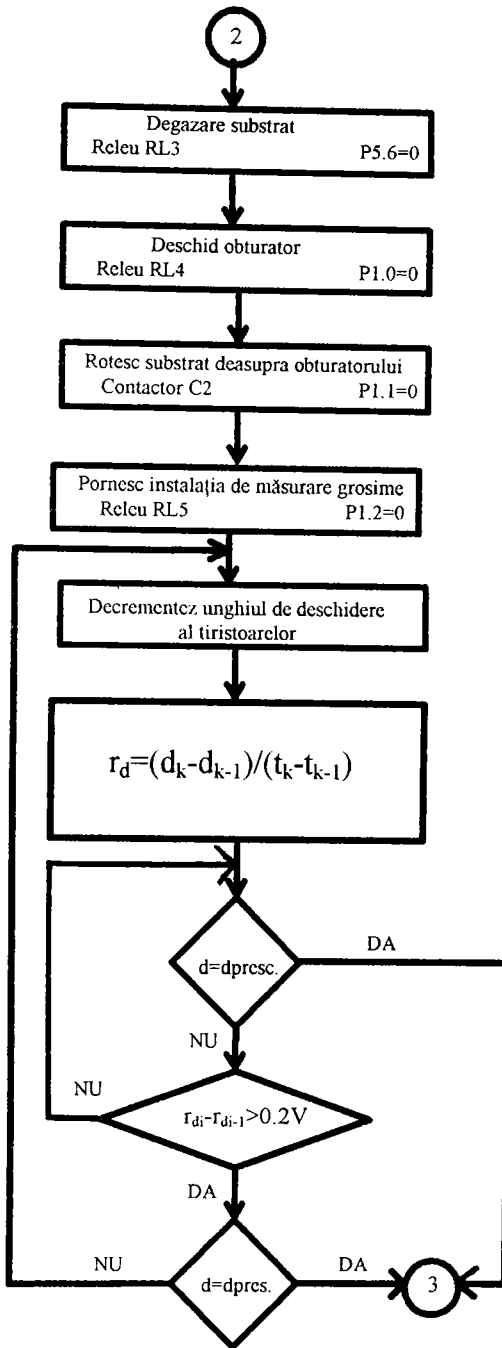


Fig 5.5.b. Ordinograma programului

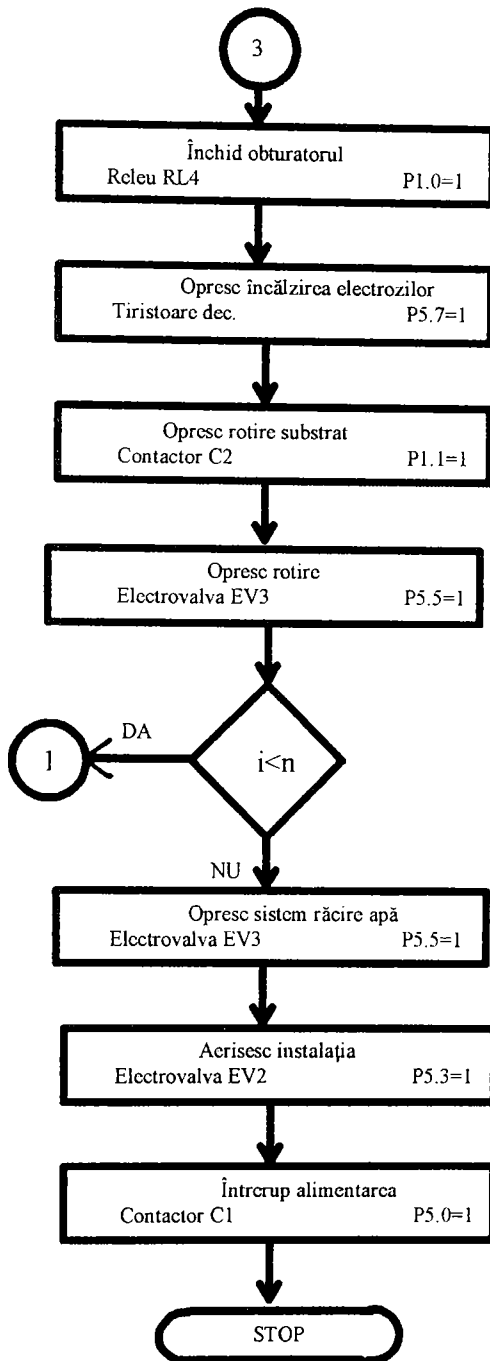


Fig. 5.5.c. Ordinograma programului

Pe baza ordinogramei și a setului de instrucțiuni specifice funcționării registrelor microcontrolerului SAB 80C535 s-a elaborat programul de conducere, comandă și control în limbaj MS-DOS MACROASSAMBLER A51V44 prezentat în Anexa 5 a lucrării. Dezvoltarea și simularea au fost executate sub un excelent pachet de emulare al familiei 8051/8053 denumit SCOPE -51 produs al firmei KEIL ELEKTRONIC. Programul este autocomentat și din această cauză, nu vom insista asupra detaliilor de realizare a diferitelor funcțiuni.

CONCLUZII

În acest capitol s-a prezentat concepția, funcționarea și realizarea unui sistem electronic automat pentru conducerea, comanda și controlul parametrelor de proces ai unei instalații industriale de depunere a straturilor subțiri prin evaporare termică în vid înal. După analiza schemelor de principiu și a ordinogramelor de operare a celor două agregate, din componența instalației AV/AE 100-500 s-au stabilit principalii parametrii tehnologici care trebuie monitorizați. A rezultat astfel necesitatea realizării sistemului automat de conducere, comandă și control în timp real, a parametrilor de proces ai instalațiilor industriale de obținere a straturilor subțiri, utilizând structuri moderne, având la bază microcontrolere dedicate, specializate în aplicații industriale.

Pornind de la aceste constatări, a fost elaborată o schemă bloc și ordinograma de operare, care cuprinde operațiile de achiziție, prelucrare dar și facilitățile de conducere, comandă, control și afișare pe care trebuie să le execute sistemul automat proiectat. Având ca bază schema bloc, a fost concepută, realizată și experimentată schema hard a microsistemului de conducere comandă și control a parametrilor de proces, utilizând circuite specializate din familia VLSI. În finalul capitolului este prezentat și autocomentat, programul de conducere, comandă și control elaborat în limbaj de asamblare A51V44 într-un dialect dedicat, specific familiei de microcontrolere bazate pe structuri 8051/8053.

Considerăm că schema prezentată pentru realizarea sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații industriale de obținere a straturilor subțiri prin evaporare termică în vid înalt, este o soluție modernă, originală, de mare eficiență, flexibilitate și fiabilitate ridicată.

CAPITOLUL 6

TESTAREA ECHIPAMENTELOR REALIZATE ȘI PREZENTAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

În Capitolul 3 al lucrării, a fost prezentată o metodă originală de măsurare și control în timp real, a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt și pe baza ei, în Capitolele 4 și 5, conceperea și realizarea unor aparate și echipamente electronice destinate acestui scop. Se impune deci, elaborarea unor metode pentru testarea *on line* a echipamentelor realizate și raportarea principalelor rezultate experimentale obținute prin utilizarea traductorului grosime-frecvență, a aparatului MGS 01 și a sistemului automat de conducere, la măsurarea și controlul cu precizie a grosimii SS depuse în instalația industrială de evaporare termică în vid înalt tip AV/AE 500.

6.1. TESTAREA ȘI EXPERIMENTAREA TRADUCTORULUI GROSIME - FRECVENȚĂ

Traductorul grosime-frecvență, având la bază oscilatorul cu cristal de cuarț realizat după schema din Fig.4.4., a fost testat și experimentat în condiții de laborator, utilizând configurația de ansamblu și aparatura specificată în Fig.6.1.

Oscilatorul traductorului grosime-frecvență, conectat în configurația prezentată a permis ridicarea următoarelor caracteristici de stabilitate:

- Stabilitatea frecvenței de oscilație în timp (o săptămână) la temperatura camerei reprezentată grafic în Fig.6.2.

A rezultat

$$\left. \frac{\Delta f}{f_0} \right|_{t \leq 7 \text{ zile}} \leq \pm 0.02 \text{ ppm} \quad (6.1)$$

ceea ce reprezintă o modificare a frecvenței cu mai puțin de 0.5Hz față de frecvența centrală de oscilație.

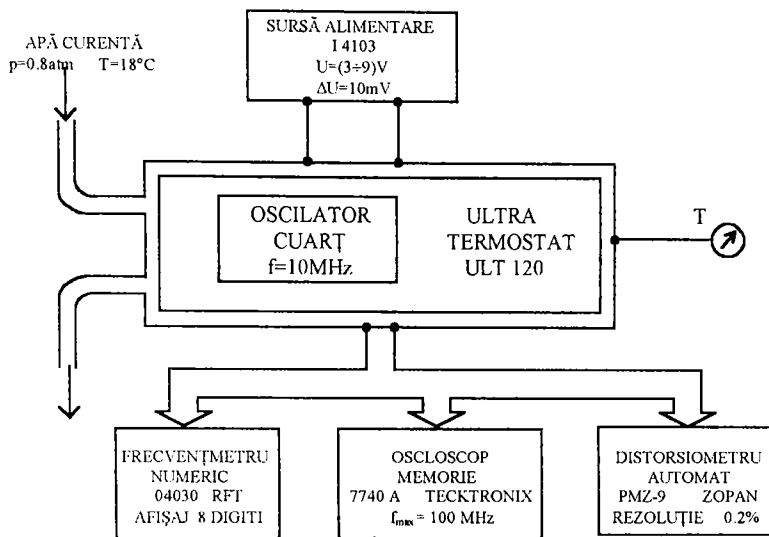


Fig. 6.1. Configurația sistemului de testare și experimentare a traductorului grosime-frecvență.

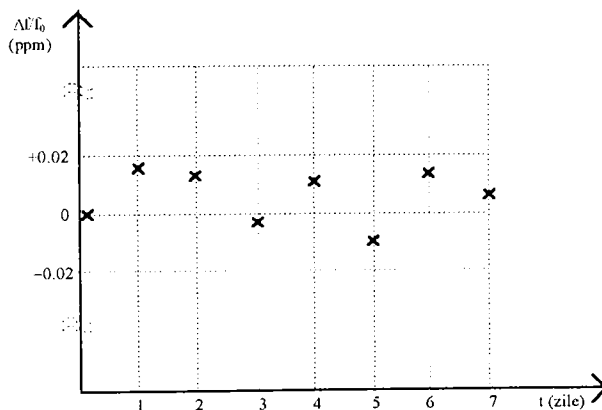


Fig. 6.2. Instabilitatea frecvenței în timp.

- Stabilitatea frecvenței de oscilație cu temperatura $t \in (20 \div 70)^\circ\text{C}$ reprezentată grafic în Fig.6.3.

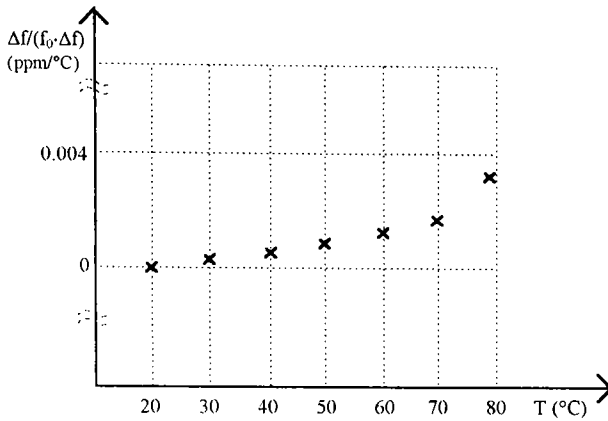


Fig. 6.3. Instabilitatea frecvenței cu temperatura.

S-a obținut

$$\left. \frac{\Delta f}{f_0 \cdot \Delta T} \right|_{T \in (20 \div 70)^\circ\text{C}} \leq 4 \cdot 10^{-9} / ^\circ\text{C} \quad (6.2)$$

cecece reprezintă o modificare a frecvenței cu mai puțin de 2Hz față de frecvența centrală de oscilație, pentru gama de temperatura dată.

- Stabilitatea frecvenței de oscilație cu tensiunea de alimentare $U \in (3 \div 9)\text{V}$ reprezentată grafic în Fig.6.4.

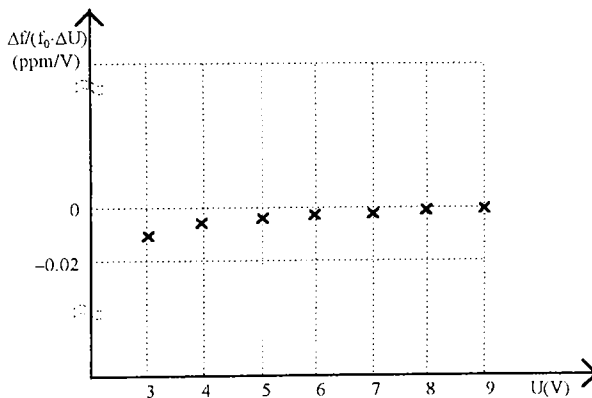


Fig.6.4. Instabilitatea frecvenței cu tensiunea de alimentare

A rezultat

$$\frac{\Delta f}{f_0 \cdot \Delta U} \Big|_{U \in (3 \div 9)V} \leq 2 \cdot 10^{-8} / V \quad (6.3)$$

ceea ce reprezintă o modificare a frecvenței cu mai puțin de 1Hz față de frecvența centrală de oscilație, pentru gama de tensiune dată.

Distorsiunile de neliniaritate măsurate cu aparatul AUTOMATIC DISTORSIONMETER PMZ-9, produs de firma KABID ZOPAN sunt mai mici decât 0.1%, valoare apropiată de rezoluția instrumentului utilizat.

Caracteristicile remarcabile obținute cu acest tip de oscilator pot fi explicate astfel:

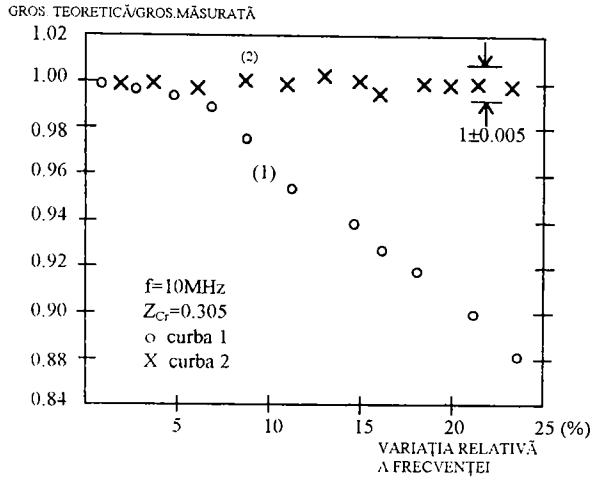
- originalitatea schemei, care face ca frecvența de oscilație să depindă numai de rapoarte ale componentelor și să poată fi ajustată fin cu o eroare absolută de numai 0.1Hz față de valoarea nominală
- utilizarea unor componente de calitate ca de exemplu: cuarț tăietură AT produs al firmei SIEMENS cu stabilitatea frecvenței în timp mai bună de 10^{-8} și coeficient de temperatură mai mic decât 0.01ppm/°C, condensatoare cu dielectric mică și metalizări argintate, rezistoare cu peliculă metalică și tranzistoare MOS cu capacități parazite reduse și un raport ridicat $r_{off}/r_{on} > 10^8$
- oscilatorul traductorului grosime-frecvență este fixat într-o montură din alamă cromată (pentru radiația căldurii) cu pereți dublii, prin care circulă apa de răcire (Fig.4.3), ceea ce îi asigură o bună termostatare (variația temperaturii în incinta vidată este numai de $2 \div 3^\circ\text{C}$).

6.2. TESTAREA ȘI EXPERIMENTAREA APARATULUI MGS 01

Testarea funcționării corecte a aparatului MGS 01, se execută după alimentarea la rețea și conectarea traductorului grosime-frecvență (neîncărcat), prin apăsarea tastei AUTOTEST. În acest mod se inițializează un ciclu fictiv de măsurare, care activează toate blocurile componente ale aparatului și se afișează rezultatul 88888888 pentru funcționarea fără defecțiuni. Orice defecțiune prezentă în sistem este semnalizată prin afișaj intermitent. Facilități suplimentare de testare sunt oferite de analiza stării indicatoarelor luminoase de: prezență rețea, avarie surse de alimentare, sau defectarea traductorului piezoelectric, prezente pe panoul frontal al aparatului.

Cu aparatul MGS 01 conectat la traductorul grosime-frecvență, situat în interiorul monturii a instalației de evaporare în vid tip AV/AE 500, s-au efectuat măsurători ale grosimii straturilor subțiri de crom depuse pe un suport dielectric de sticlă Corning 7059. Experimentările s-au efectuat monitorizând viteza de evaporare ($r_d = \text{const.}$) și procedând la măsurarea grosimii momentane a stratului depus, utilizând

atât relația (3.7) (tehnica de măsurare a perioadei) cât și relația (3.9) (tehnica de măsurare a frecvenței corectată). Rezultatul măsurărilor efectuate cu aparatul MGS 01 pentru o variație relativă a frecvenței de rezonanță a cristalului de cuarț de până la 20% din frecvența inițială, sunt reprezentate grafic în Fig.6.5.

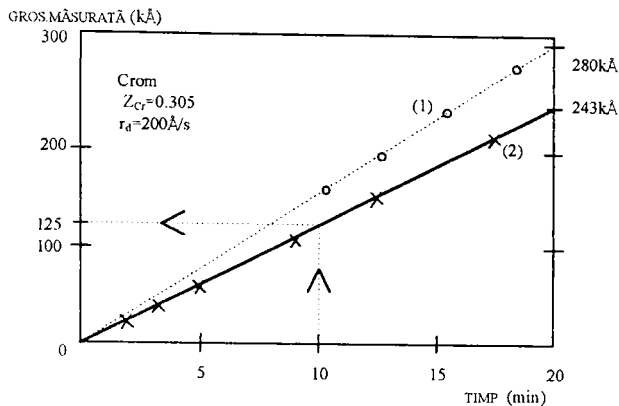


- o curba (1) - măsurări corespunzătoare utilizării relației (3.7)
- X curba (2) - măsurări corespunzătoare utilizării relației (3.9)

Fig.6.5. *Dependența grosimii normalizate de variația relativă a frecvenței traductorului.*

Din analiza graficelor, se constată că prin utilizarea tehnicii de măsurare a frecvenței corecte (implementarea relației 3.3) la determinarea grosimii straturilor subțiri, erorile produse la măsurare sunt mai mici decât 0.5%, pentru o gamă largă a variației frecvenței de rezonanță a cristalului de cuarț. Utilizând însă tehnica de măsurare a perioadei (implementarea relației 3.7) se obține o curbă crescătoare a erorilor relative, care pot atinge chiar 15% pentru o variație a frecvenței de oscilație a traductorului de până la 20% din valoarea nominală. Această tehnică poate fi însă utilizată cu erori rezonabile (<1%), dacă variația frecvenței de rezonanță a cristalului de cuarț nu depășește 5% din valoarea frecvenței inițiale.

Păstrând viteza de evaporare constantă la 200Å/s, au fost efectuate cu aparatul MGS 01 măsurări comparative ale grosimii momentane, utilizând cele două tehnici prezentate în Capitolul 3. Rezultatele obținute sunt ilustrate grafic în Fig.6.6.



- o curba (1) - măsurări corespunzătoare utilizării relației (3.7)
- X curba (2) - măsurări corespunzătoare utilizării relației (3.9)

Fig.6.6. Dependența grosimii măsurate de timp.

Pentru timpi de depunere de până la 10min. (grosimi teoretice de 120kÅ) diferența dintre grosimile indicate de aparatul MGS 01 corespunzătoare celor două tehnici de măsurare propuse, sunt neglijabile. Continuând însă depunerea, se constată o creștere sensibilă a erorilor produse la măsurare, dacă se utilizează tehnica de măsurare a perioadei.

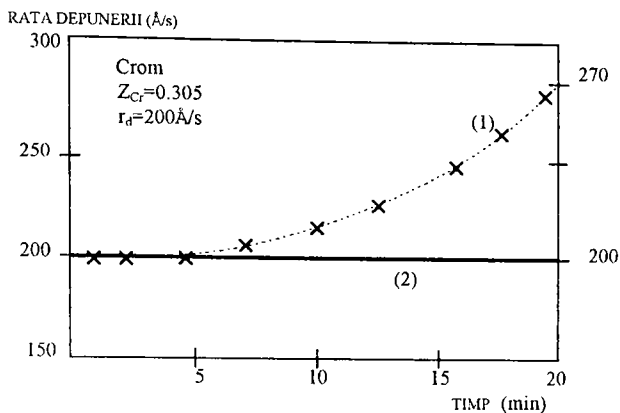
După 20min. de la începerea procesului de depunere (grosimi teoretice de 240kÅ) aparatul MGS 01 indică o grosime de 280kÅ (deci o eroare relativă de 14%) prin tehnica de măsurare a perioadei, respectiv o grosime de 243kÅ (eroare relativă de 1%) prin tehnica de măsurare a frecvenței corectate.

În aceleași condiții de depunere menținând constantă rata depunerii $r_d=200\text{Å/s}$ determinată prin implementarea relației (3.23) și măsurând la diferite momente de timp rata depunerii indicată de aparat prin implementarea relației (3.22) s-a obținut un set de valori care sunt reprezentate grafic în Fig.6.7.

Așa cum era previzibil, datorită erorilor produse la măsurarea grosimii SS prin tehnica măsurării perioadei, vor apare inerent, erori sistematice și la măsurarea vitezei de evaporare, prin același procedeu. Graficul prezentat în Fig.6.7. arată că numai după 3min. de la începerea procesului de depunere, aparatul MGS 01 indică valori diferite pentru rata depunerii determinată prin tehnica de măsurare a perioadei.

Eroarea relativă de aproximativ 30% produsă la măsurarea ratei depunerii prin acest procedeu, (după 20min.) poate fi explicată prin cumulara erorilor produse la măsurarea grosimilor corespunzătoare la două momente succesive de timp (d_{19} , d_{20}):

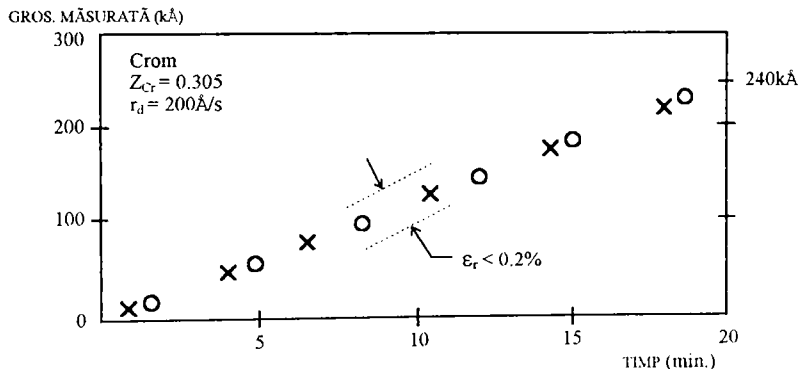
$$\frac{\Delta r_d}{r_d} (\%) = \left(\frac{\Delta d_{19}}{d_{19}} + \frac{\Delta d_{20}}{d_{20}} \right) \cdot 100 \quad (6.4)$$



- curba 1 - măsurări corespunzătoare utilizării relației (3.22)
- curba 2 - măsurări corespunzătoare utilizării relației (3.23)

Fig.6.7. Dependența vitezei de evaporare măsurată în funcție de timp.

Utilizând tehnica de măsurare a frecvenței corectate pentru determinarea grosimii SS de crom, au fost efectuate determinări comparative de grosime, pentru două modalități optimale de poziționare a traductorului piezoelectric în incinta vidată (tratate în Capitolul 3 al lucrării). Rezultatul măsurătorilor este sintetizat în Fig.6.8.



- x Curba (1) - traductor poziționat într-un plan paralel cu suportul plăchetă la $\Delta y/y=0.2$
- o Curba (2) - traductor poziționat într-un plan tangent la sfera cu centru în evaporator și de rază egală cu distanța evaporator-substrat

Fig.6.8. Dependența temporală a grosimii măsurată cu aparatul MGS 01 pentru două modalități de poziționare spațială a traductorului piezoelectric în incinta vidată

După cum se poate constata din analiza curbelor prezentate în Fig.6.8, aparatul MGS 01 a indicat grosimi foarte apropiate (erori relative mai mici decât 0.2%), ceea ce confirmă corectitudinea relațiilor și a concluziilor dezvoltate în paragraful 3.4.

6.3. TESTAREA ȘI EXPERIMENTAREA ECHIPAMENTULUI AUTOMAT DE CONDUCERE A PARAMETRILOR DE PROCES

Data fiind complexitatea echipamentului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații industriale de depunere a straturilor subțiri în vid înalt, a fost necesară, implementarea încă din faza de proiectare, a toleranței de defecțiuni. Pentru asigurarea în timp real, a unei testabilități facile s-au conceput două teste de verificare (soft și hard) având ca bază modele de defecțiuni, astfel elaborate încât să acopere o gamă cât mai largă a defecțiunilor posibile cu probabilitate mai ridicată de apariție.

A. Testarea prin metode software

În memoria EPROM a microcontrolerului a fost implementat un program de autotest care se apelează după conectarea tensiunii de alimentare sau la resetarea sistemului, dacă se constată că tasta zero este apăsată. Ordinograma programului de testare a echipamentului automat de conducere a parametrilor de proces este prezentată în Fig.6.9.

Testarea memoriei SRAM se execută prin scrierea în fiecare locație de memorie a valorilor AAH și 55H. Simultan cu testul de memorie se testează practic și microcontrolerul, întrucât în testul de memorie se vor utiliza majoritatea instrucțiunilor acestora. Dacă memoria testată este funcțională, microsistemul va transmite calculatorului PC pe interfața serială mesajul “TEST MEMORIE O.K!”, iar dacă se depistează erori, va transmite mesajul “EROARE MEMORIE <adr>” unde <adr> reprezintă adresa primei locații de memorie defectă. Prin testarea memoriei SRAM se verifică circuitele UI (74HCT573), porturile P₀ și P₂ ale microcontrolerului, întrucât prin aceste porturi se transmit datele și adresele.

Testarea memoriei EPROM se bazează pe efectuarea sumei de control pe 16 biți, adică a tuturor valorilor locațiilor de memorie și compararea rezultatului cu valoarea înscrisă (la programarea memoriei) în ultimele două locații de memorie. Dacă suma de control calculată coincide cu valoarea înscrisă, microsistemul va transmite pe interfața serială mesajul “SUMA DE CONTROL EPROM O.K!”, iar în caz contrar mesajul “EROARE ÎN EPROM”.

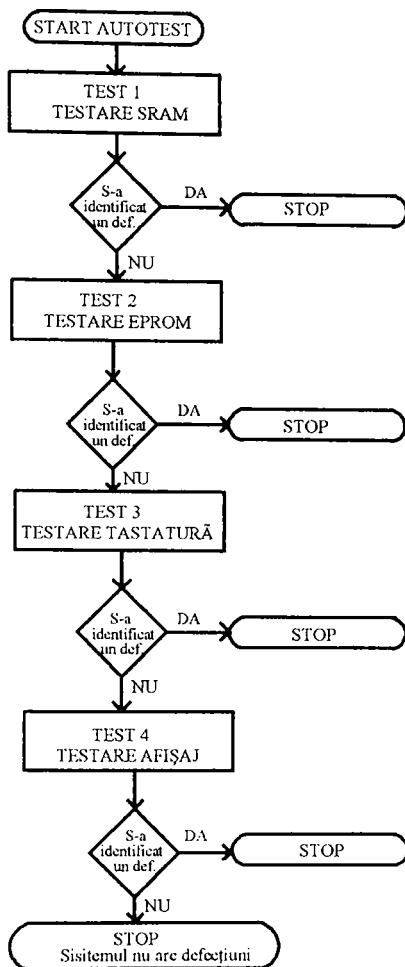


Fig.6.9. Ordinograma programului de autotestare

Pentru executarea testului de tastatură, microsistemul transmite pe interfața serială mesajul “APĂSAȚI TASTA XX”, unde “XX” reprezintă tasta ce urmează să fie acționată. Dacă tasta funcționează corect, după două secunde se poate trece la verificarea următoarei taste. Defecțiunile constatate sunt specificate prin mesajul “TASTA XX DEFECTĂ”.

În cadrul testului de afișaj se verifică dacă elementele blocului de afișare funcționează corect. Pentru aceasta microsistemul transmite prin interfața serială calculatorului PC mesajul “VERIFICARE AFIŞAJ-TOATE SEGMENTELE TREBUIE SĂ FIE APRINSE”. Dacă după recepționarea acestui mesaj există segmente stinse, înseamnă că celula de afișare testată este defectă. Pentru a verifica

dacă există scurtcircuite între două celule adiacente, microsistemul transmite la calculatorul PC mesajul "NUMAI UN SEGMENT ESTE APRINS". Ca urmare, succesiv, la interval de 2 secunde, trebuie să se aprindă numai câte un segment al fiecărui digit. Dacă un segment este defect, atunci el va fi stins în timpul testului, iar dacă există scurtcircuite între segmente, se vor aprinde simultan două sau mai multe segmente ale aceluiași digit.

B. Testarea prin metode hardware

Testarea hard este recomandată atunci când majoritatea resurselor sistemului funcționează corect, dar existența unor defecțiuni, face imposibilă execuția programului de autotest, sau transmiterea mesajelor la calculatorul PC. Pentru detectarea componentelor defecte în aceste situații este necesară intervenția operatorului cu aparatură de investigare specializată. Fig.6.10. prezintă o fotografie a configurației de ansamblu-utilizată la testarea sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații industriale de evaporare termică în vid înalt.

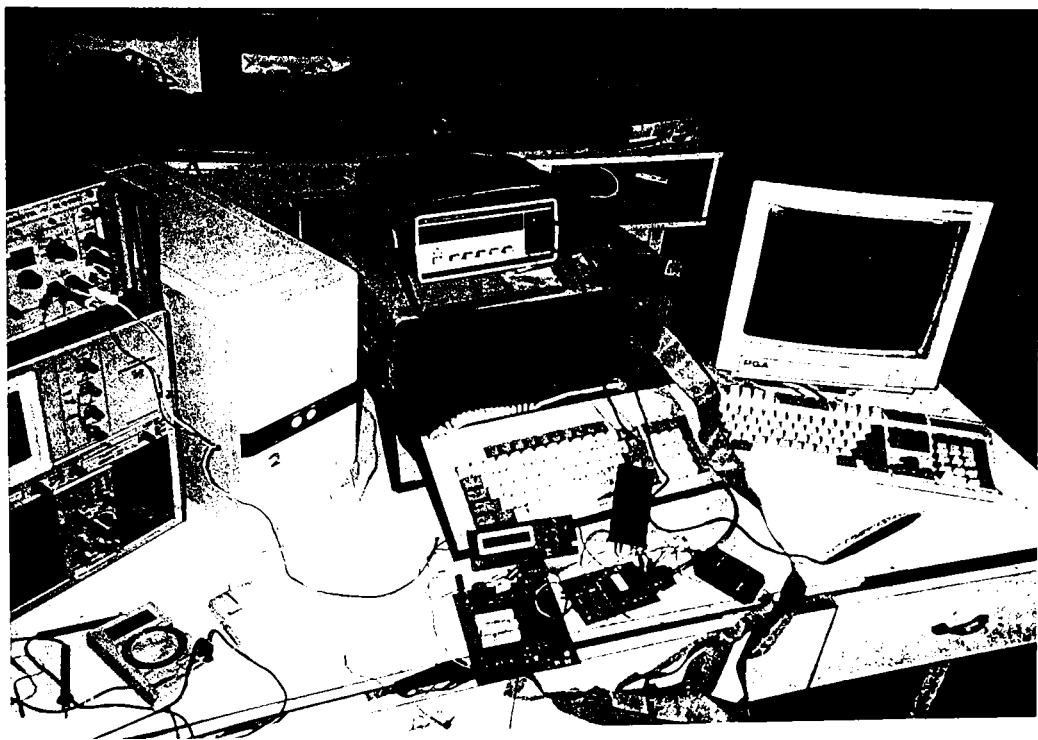


Fig.6.10. Configurația de ansamblu a echipamentelor utilizate la testarea sistemului automat de conducere a parametrilor de proces

S-au utilizat pentru testare următoarele echipamente specializate în diagnosticarea defecțiunilor din sisteme numerice complexe:

- sursă triplă de alimentare stabilizată (+5V±8V) tip E4109
- osciloscop cu memorie $\Delta f=500\text{MHz}$ tip 7704A TECKTRONIX
- calculator PC tip 5586/133MHz
- analizor logic tip PM 3655 PHILIPS
- analizor de semnături tip HP 504A HEWLETT PACKARD

Localizarea defecțiunilor cu ajutorul osciloscopului presupune următoarele verificări:

- prezența tensiunii de alimentare la fiecare circuit, nu numai ca valoare dar și existența eventualelor zgomote suprapuse
- vizualizarea semnalului de tact al microcontrolerului
- vizualizarea semnalelor pe magistralele de date și adrese (porturile P_0 și P_2)
- se vizualizează linia de transmisie a microcontrolerului (semnalul TXD). Prin intermediul acestei linii se transmit mesajele de la microsistem la calculator, iar pe durata fiecărui mesaj se pot vizualiza datele transmise.
- se vizualizează semnalul ALE, semnal periodic cu frecvența 1/6 din frecvența semnalului de tact
- se vizualizează semnalul PSEN. Acest semnal trebuie să prezinte o formă de undă asemănătoare cu cea a semnalului ALE, însă durata impulsurilor este mai mare
- se vizualizează semnalele *RD și *WR. Aceste semnale devin active (zero logic) numai pe durata scrierii și citirii memoriei de date și deci în timpul funcționării corecte a sistemului, pe aceste linii pot fi vizualizate impulsuri neperiodice
- se vizualizează semnalul KBR (circuitul U6B). Acest semnal devine activ (zero logic) numai la citirea tastaturii, deci pe ecranul osciloscopului se pot vizualiza trenuri de impulsuri

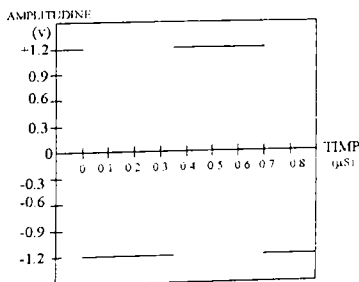


Fig.6.11. Achiziționarea unui semnal dreptunghilar cu frecvența de 1.42kHz și amplitudinea de 2.4V

- pentru testarea intrărilor analogice se achiziționează un semnal dreptunghiular având caracteristicile din Fig.6.11. și se vizualizează semnalele corespunzătoare pinilor PP, P₁ și D₁ ai microcontrolerului. Circuitele analogice de intrare sunt decretate defecte, dacă pe pinii specificați, lipsesc semnalele dreptunghiulare cu amplitudinea și frecvența semnalului de test
- testarea ieșirilor sistemului automat de conducere a parametrilor de proces se realizează aducând în conducție, succesiv fiecare grup de tiristoare. Deschiderea sigură a tiristoarelor se realizează cu trenuri de trei impulsuri având perioada de 100μs. Controlul curentului prin sarcină se efectuează numeric în cuante de 75μs. Durata T_d este discretizată în 99 de cuante de 75μs, care constituie pașii în care pot fi amorsate tiristoarele. Fig.6.12. prezintă formele de undă măsurate cu osciloscopul pentru cazul în care se urmărește obținerea prin sarcina a unui curent de 50% din valoarea nominală (comanda curentului prin electrozii evaporatorului).

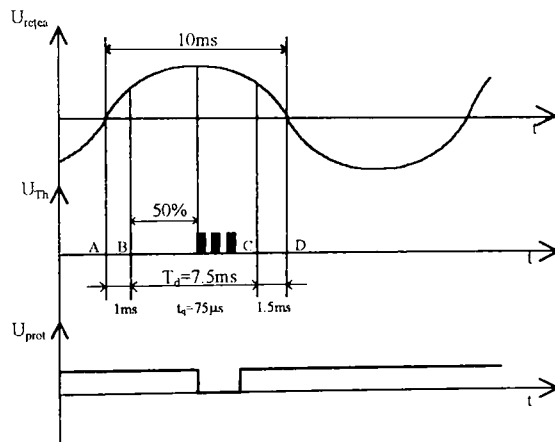


Fig6.12. Formele de undă utilizate la comanda tiristoarelor.

Semnalul U_{prot} (activ pe zero) informează microcontrolerul asupra stării de conducție a tiristoarelor și este necesar în vederea protejării acestora împotriva caracterului inductiv al impedanței de sarcină.

Dată fiind complexitatea sistemului automat de conducere a parametrilor de proces organizat în jurul microcontrolerului SAB 80C535, o posibilitate mai rapidă și mai elegantă de testare, o constituie utilizarea pentru diagnosticarea defectelor a unui analizor logic. În acest mod se pot vizualiza simultan un mare număr de semnale numerice din sistem și se poate urmări în același timp corelația lor temporală. Fig.6.13. prezintă un exemplu de analiză logică și temporală executată asupra sistemului automat de conducere a parametrilor de proces, utilizând analizorul logic PM 3655 produs de firma PHILIPS.

DISPLAY

Jan 9 1997 01:44p

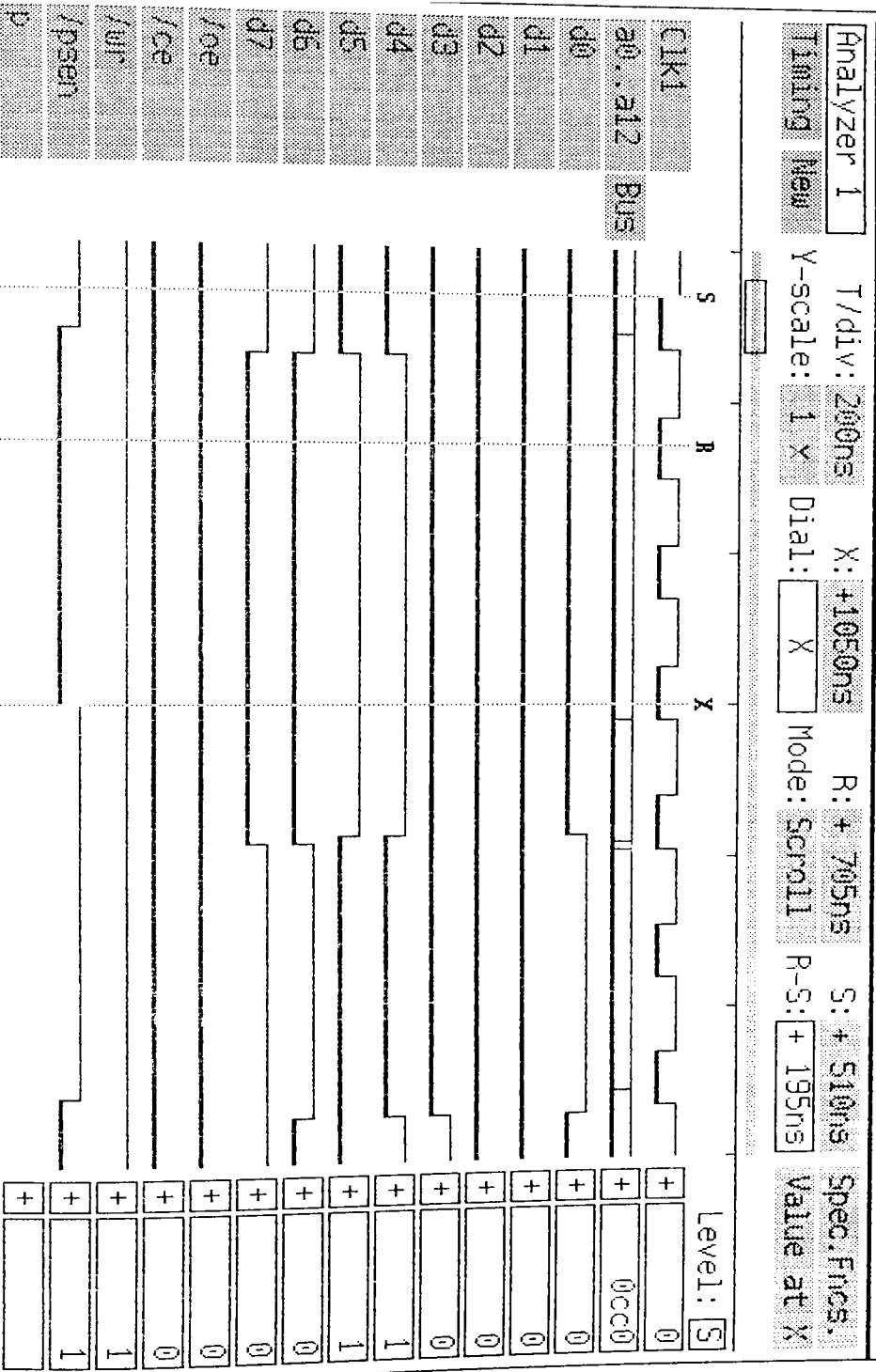


Fig.6.13. Formele de undă vizualizate cu analizorul logic PM 3655.

Facilități sporite la testarea sistemului automat de conducere a parametrilor de proces sunt asigurate de aplicarea tehnicilor moderne de compresie a datelor numerice, oferite prin utilizarea analizoarelor de semnături. Pe durata ferestrei temporale deschisă cu ajutorul semnalilor de *RD și *WR se achiziționează și se analizează datele captate de pe magistralele de date și de adrese ale microcontrolerului. Rezultatul compresiei, exprimat în cod hexazecimal modificat, poartă numele de semnătură. În Fig.6.14. sunt sintetizate cele mai importante rezultate experimentale din ordinograma de verificare elaborată pentru testarea sistemului automat al parametrilor de proces utilizând analizorul de semnături HEWLETT PACKARD tip HP 504A.

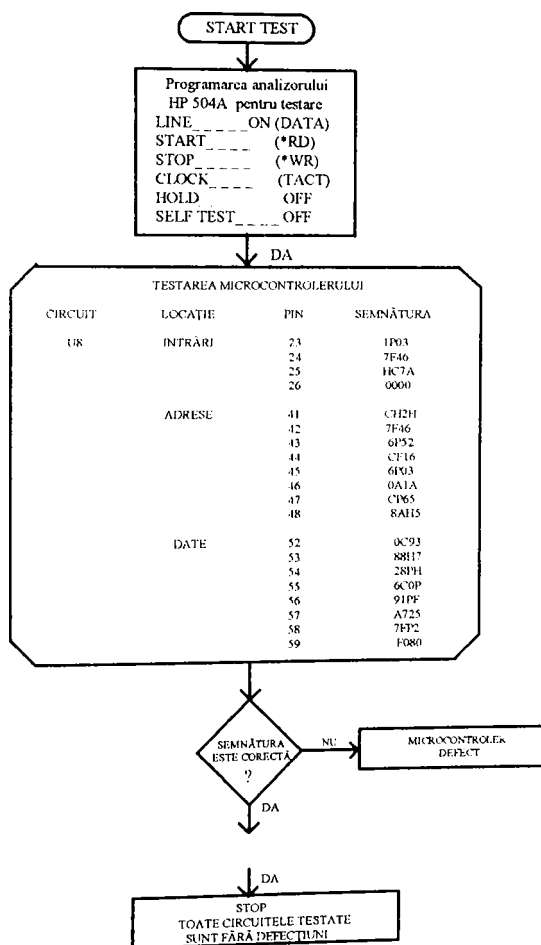


Fig.6.14. Rezultate experimentale obținute la testarea cu analizorul de semnături HP 504A

6.4. CONCLUZII

Studiul inițiat a urmărit elaborarea unor metode eficiente de testare și experimentare a echipamentelor electronice concepute în scopul măsurării și controlului automat în timp real, a grosimii SS. Pe baza soluțiilor propuse și a configurațiilor de testare prezentate, au putut fi experimentate, în condiții reale, atât echipamentele pentru măsurarea grosimii și a vitezei de evaporare (traductorul grosime-frecvență și aparatul MGS 01) cât și sistemul automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces, din instalația industrială de evaporare în vid înalt AV/AE 500.

Experimentarea traductorului grosime-frecvență în condiții reale de funcționare, a condus la obținerea de caracteristici remarcabile privind precizia, stabilitatea în timp, cu temperatura și cu tensiunea de alimentare. Aceste caracteristici sunt explicabile, dacă ne referim la: originalitatea schemei, folosirea componentelor profesionale dar și la tehnologia de realizare aplicată.

Utilizarea aparatului MGS 01 la măsurarea grosimii și a vitezei de evaporare a SS depuse în instalația industrială AV/AE 500 a confirmat rezultatele teoretice și expresiile matematice deduse în Capitolul 3. Se poate constata că aplicarea în procesul de măsurare a unor relații exacte (3.22 și 3.23) de dependență a grosimii, atât de caracteristicile traductorului cât și de natura materialelor depuse, asigură uniformitatea depunerilor și crește semnificativ precizia măsurărilor. Experimentările efectuate aplicând corecția măsurărilor datorită poziționării spațiale a traductorului piezoelectric în incinta vidată, au confirmat existența unor poziții critice, pentru care eroarea produsă la măsurare se anulează.

Data fiind complexitatea ridicată a echipamentului pentru conducerea parametrilor de proces și implicit a numărului mare de informații solicitate de o diagnoză completă, au fost elaborate metode originale de testare atât soft cât și hard.

Implementarea unui program de autotestare a principalelor circuite din componența microsistemului conferă sistemului conceput, caracteristici specifice echipamentelor moderne, autotestabile cu redundanță neseparabilă.

Întrucât monitorizarea și corecția comportării microsistemului este funcție de secvența internă de date și de modul în care se manipulează datele externe, au fost concepute metode hard de analiză logică și temporală, corelate cu tehnicile actuale de compresie a secvențelor numerice achiziționate. În acest mod a fost posibilă elaborarea unei ordinograme complete de diagnosticare a defectelor-foarte utilă în faza de depanare-prin utilizarea celor mai moderne instrumente de testare (analizorul logic și analizorul de semnături).

CAPITOLUL 7

CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CONCLUZII FINALE

Tendința actuală de miniaturizare și compactizare a circuitelor electronice, presupune pe lângă reconsiderarea strategiilor tradiționale de proiectare și o nouă concepție în structurarea metodelor și echipamentelor de măsurare și control a parametrilor procesului tehnologic. În scopul declarat al obținerii de performanțe, autorul s-a străduit să aducă contribuții originale atât la măsurarea cu precizie a grosimii SS utilizate curent în microelectronică, cât și la elaborarea unor echipamente electronice flexibile capabile să asigure conducerea, comanda și controlul, instalațiilor industriale de evaporare termică în vid înalt.

7.1. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Pe parcursul celor șapte capitole ale tezei de doctorat se evidențiază următoarele contribuții originale mai importante:

CAPITOLUL 1

1.1. Prezentarea sistematică a fenomenelor fizico-chimice și structurale care stau la baza obținerii straturilor subțiri, precum și a echipamentelor necesare realizării unor pelicule uniforme de natură, diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt.

1.2. O analiză comparativă din punct de vedere al performanțelor raportate în literatura de specialitate pentru principalele procedee industriale de obținere a straturilor subțiri utilizate curent în microelectronică. A rezultat că atât pulverizarea catodică cât și evaporarea termică sunt procedee tehnologice bazate pe procese fizice, care solicită aplicarea unor metode specifice de măsurare și control în timp real, a grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv.

1.3. Elaborarea unui studiu teoretic al distribuției grosimii straturilor subțiri depuse pe suport plan în condițiile reale de funcționare ale instalațiilor industriale de evaporare termică și pulverizare catodică în vid înalt. Formulele deduse (1.4÷1.6) au

demonstrat că indiferent de procesul tehnologic utilizat, se obțin straturi cu grosimea neuniformă, dependentă de forma și geometria evaporatorului, de distanța evaporator-substrat, de condițiile energetice, dar și de presiunea parțială a gazelor reziduale din incinta vidată.

1.4. Prezentarea în sinteză a principalelor cerințe impuse metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri utilizate curent în tehnologia dispozitivelor semiconductoare și a circuitelor integrate. Se poate constata că aceste cerințe sunt multiple și deosebit de severe pentru a putea fi satisfăcute în totalitate de către un singur procedeu sau echipament.

1.5. Din analiza fenomenului denumit "*efectul de dimensiune*" a rezultat că grosimea stratului subțire, intervine atât în calculul conductibilității electrice, a mobilității purtătorilor de sarcină sau fotoconductibilității straturilor, cât și în calculul coeficienților termoelectrice, termomagnetici, galvanometrici, precum și în numeroase fenomene de transport, specifice funcționării dispozitivelor peliculare.

1.6. O selecție riguroasă a principalelor exemple de aplicații reprezentative din microelectronică, care solicită măsurarea și controlul cu precizie a grosimii straturilor subțiri. Studiul inițiat a demonstrat că, pe lângă interesul pur teoretic privind cercetările fundamentale legate de structura și comportarea materialelor sub formă de straturi subțiri, există și un interes practic, grosimea stratului reprezentând un parametru de proiectare important pentru numeroase dispozitive semiconductoare și circuite integrate monolitice sau hibride.

CAPITOLUL 2

2.1. O prezentare unitară a principiilor universal acceptate pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat. A rezultat că grosimea stratului se poate obține prin integrarea semnalului proporțional cu viteza de depunere și reciproc, prin diferențierea semnalului proporțional cu grosimea stratului se poate determina viteza de depunere a moleculelor pe substrat.

2.2. O amplă analiză a principalelor metode și procedee cunoscute în literatură pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri depuse în instalații industriale de vid înalt. Studiul efectuat a arătat că grosimea stratului depus constituie un parametru fizic, geometric și tehnologic, măsurabil direct sau indirect, fie în timpul procesului de depunere, fie după scoaterea probei din instalația în care a fost obținută.

2.3. O prezentare în sinteză comparativă a principalelor performanțe oferite de metodele și procedeele cunoscute în literatura de specialitate pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri, atât din punct de vedere al domeniului de măsurare, cât și al preciziei sau rezoluției raportate.

2.4. Analiza comparativă a principalelor metode și procedee cunoscute pentru măsurarea grosimii SS, a demonstrat că nu toate sunt suficient de precise sau comode de aplicat în producția de serie a peliculelor subțiri sau a dispozitivelor electronice și a circuitelor integrate realizate cu acestea.

2.5. Elaborarea unui studiu prospectiv privind domeniile tipice de aplicații la care se pretează utilizarea tehnicilor prezentate de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri depuse în instalațiile industriale de vid înalt.

CAPITOLUL 3

3.1. Prezentarea în sinteză a metodei cuarțului rezonant utilizată la măsurarea grosimii straturilor subțiri, ca reprezentând cea mai potrivită soluție pentru aplicațiile microelectronicii, datorită caracterului de universalitate și facilităților oferite la automatizarea procesului de depunere.

3.2. Creșterea preciziei la măsurarea grosimii straturilor subțiri utilizând o variantă modificată a metodei cuarțului rezonant prin introducerea conceptului de "impedanță acustică" (relația 3.8) și prezentarea unei expresii mai exacte a dependentei grosime-frecvență (relația 3.9)

3.3. Deducerea expresiilor exacte ale grosimii momentane (relația 3.19) și a vitezei de evaporare (relația 3.23) funcție de parametrii traductorului utilizat și de caracteristicile materialelor depuse.

3.4. Elaborarea unei metode originale pentru măsurarea și controlul în timpul procesului tehnologic, a grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt (evaporare termică și pulverizare catodică).

3.5. Studiul și evaluarea erorilor produse la măsurarea grosimii straturilor subțiri, datorate poziționării spațiale a traductorului piezoelectric în incinta vidată.

3.6. Calculul funcțiilor (relațiile 3.31; 3.35; 3.36) care descriu distribuția erorilor relative produse la măsurare, pentru diferite modalități practice de amplasare spațială a traductorului în interiorul incintei vidate.

3.7. Stabilirea poziției optime de amplasare spațială a traductorului piezoelectric în instalația de evaporare (fig. 3.8.), pentru care erorile relative obținute la măsurarea grosimii straturilor subțiri, sunt minime.

3.8. Calculul comparativ și stabilirea unei relații de ordine (relația 3.39) între erorile relative datorate rotațiilor unghiulare (relația 3.37) și erorile relative produse datorită deplasărilor axiale (relația 3.38) ale traductorului față de poziția spațială optimă care minimizează erorile produse la măsurare.

CAPITOLUL 4

4.1. Elaborarea unei ordinograme de funcționare a unui echipament pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt, care evidențiază principalele operații de inițializare, memorare, calcul și monitorizare, pe care trebuie să la îndeplinească.

4.2. Conceperea și realizarea unei sonde pentru montarea traductorului de măsurare a grosimii straturilor subțiri în instalație industrială de evaporare în vid înalt tip AV-AE 100/500, care asigură în același timp și termostatarea oscilatorului.

4.3. Realizarea și experimentarea unui traductor pentru măsurarea grosimii straturilor subțiri și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat, bazat pe modificarea frecvenței de rezonanță a unui oscilator cu cristal de cuarț, tăietură AT de mare stabilitate a frecvenței și amplitudinii oscilațiilor. Traductorul de măsurare grosime-frecvență prezentat, constituie obiectul certificatului de inovator Nr. 1789/1985.

4.4. Conceperea unei structuri optimale de aparat original pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri și a vitezei de evaporare, utilizând un minicalculator "on chip", dedicat aplicațiilor industriale.

4.5. Realizarea și experimentarea unui aparat versatil de mare precizie pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt. Soluția prezentată constituie obiectul brevetului de inventator Nr. 93890/1987.

CAPITOLUL 5

5.1. O sistematizare unitară a principalilor parametri de proces, care trebuie achiziționați, prelucrați, controlați precum și elaborarea facilităților de comandă, acționare sau semnalizare solicitate de automatizarea instalațiilor industriale de obținere a straturilor subțiri, prin evaporare termică în vid înalt.

5.2. Elaborarea unei scheme bloc și prezentarea funcționării sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces din instalațiile industriale de obținere a straturilor subțiri prin evaporare termică în vid înalt.

5.3. Se propune o nouă structură de sistem electronic pentru conducerea, comanda și controlul parametrilor de proces ai unei instalații industriale de obținere a straturilor subțiri prin evaporare termică de vid înalt, care înglobează un sistem utilizând microcontrolerul SAB 80C535, dedicat rețehnologizărilor industriale.

5.4. Conceperea, proiectarea, realizarea și experimentarea unui sistem automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces, utilizând circuite specializate din generația VLSI destinate aplicațiilor industriale.

5.5. Prezentarea și descrierea circuitelor componente ale sistemului automat pentru conducerea, comanda și controlul parametrilor de proces ai instalației industriale AV/AE 500 pentru obținerea straturilor subțiri prin evaporarea termică în vid înalt.

5.6. Elaborarea ordinogramei și conceperea programului de conducere, comandă și control în limbaj MS-DOS MACROASSEMBLER A51 V44, pe care trebuie să-l execute sistemul automat de monitorizare a unei instalații industriale de depunere a straturilor subțiri prin evaporarea termică în vid înalt.

CAPITOLUL 6

6.1. Elaborarea unei configurații optime pentru testarea în condiții de laborator a traductorului grosime-frecvență. Rezultatele experimentale au evidențiat caracteristici remarcabile, explicabile atât prin originalitatea schemei, cât și prin calitatea componentelor utilizate și a tehnologiei de realizare aplicată.

6.2. Confirmarea rezultatelor teoretice și a relațiilor matematice deduse în Capitolul 3, prin utilizarea aparatului MGS 01 la măsurarea grosimii și a vitezei de evaporare a SS depuse în instalația industrială de evaporare termică în vid înalt AV/AE 500.

6.3. Conceperea unei metode originale de testare soft a sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces prin implementarea unui program de autotestare a principalelor circuite din componența microsistemului.

6.4. Pentru monitorizarea și corecția comportării microsistemului experimentat, au fost elaborate metode hard de analiză logică și temporală corelate cu tehnicile actuale de compresie a datelor numerice.

6.5. Concepția și realizarea unei ordinograme complete de diagnosticare, deosebit de utilă în faza de depanare, prin utilizarea celor mai moderne instrumente de testare, (analizorul logic și analizorul de semnături).

Alte contribuții originale se referă activitatea de publicare a cercetărilor, din domeniul metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii SS, în lucrări științifice, cărți tehnice și manuale didactice.

7.2. CONCLUZII FINALE

Teza de doctorat prezentată, abordează aspectele principale legate de creșterea preciziei la măsurarea și controlul grosimii SS, precum și la dezvoltarea

echipamentelor electronice de conducere a proceselor tehnologice aferente. În analiza, proiectarea și realizarea metodelor și echipamentelor descrise în materialul prezentat, se aduc contribuții originale. Preocupările autorului în domeniu sistemelor de măsurare și a sistemelor de conducere a proceselor industriale, sunt în consens cu orientarea actuală către re tehnologizarea echipamentelor de producție, utilizând structuri bazate pe microcalculatoare dedicate.

Obiectivele principale ale cercetării urmărite în lucrare, au vizat în principal soluționarea următoarelor probleme importate:

- elaborarea unei metode optime pentru măsurarea cu precizie a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat
- conceperea și realizarea unui aparat electronic, destinat măsurării și controlului în timp real a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de evaporare termică în vid înalt
- conceperea și realizarea unui echipament electronic automat pentru conducere, comanda și controlul parametrilor procesului tehnologic de obținere a straturilor subțiri, utilizând instalația de evaporare termică în vid înalt AV/AE 500
- elaborarea unor metode și modele eficiente de testare și experimentare “on line” a echipamentelor concepute pentru măsurarea și controlul automat a grosimii SS de natură diferită, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt, precum și a echipamentelor realizate pentru monitorizarea proceselor tehnologice.

Teza de doctorat prezentată este structurată pe șapte capitole extinse pe 116 pagini, are inserate 91 figuri, 77 formule matematice și face referire la 109 titluri bibliografice. De asemenea conține 7 Anexe, cuprinzând caracteristicile materialelor și circuitelor utilizate precum și listarea în limbaj de asamblare a programului de conducere, comandă și control a parametrilor de proces din instalația industrială AV/AE 500.

În concordanță cu obiectivele urmărite, principalele realizări cuprinse în lucrare pot fi rezumate astfel:

1. Prezentarea unitară a procedeelelor convenționale utilizate în microelectronică pentru obținerea industrială a straturilor subțiri prin evaporare termică și pulverizare catodică cât. A rezultat că atât pulverizarea catodică și evaporarea termică sunt procedee tehnologice bazate pe principii fizice, care solicită aplicarea unor metode specifice de măsurare și control a grosimii SS depuse. Aceste aspecte, prezentate sistematic în teza de doctorat, au fost dezvoltate și publicate de autor în cartea tehnică “*Circuite electronice în tehnologia hibridă-Aplicații*”, |CH, 89-3|.
2. Elaborare unui studiu complet al distribuției grosimii SS condensate pe substrat, a demonstrat că indiferent de procedeul tehnologic utilizat, se obțin structuri cu grosimea neuniformă, dependente de forma și geometria

evaporatorului, de distanța evaporator substrat, de condițiile energetice, dar și de presiunea parțială a gazelor reziduale din incinta vidată. Rezultatele studiului inițiat au fost publicate de autor în reviste de specialitate [CH, 83-2] și în volume ale Conferințelor Naționale de Electronică [CH, 83-2] și [CH, 88].

3. Analiza fenomenului denumit "*efect de dimensiune*" a demonstrat că grosimea stratului, ca parametru de proiectare, intervine atât în calculul conductibilității electrice a mobilității purtătorilor de sarcină sau fotoconductibilității straturilor, cât și în calculul coeficienților termoelectrice, termomagnetici, galvanometrici, precum și în numeroase fenomene de transport, specifice funcționării dispozitivelor peliculare și traductoarelor realizate cu SS. Rezultatele cercetărilor în acest domeniu au fost publicate în periodice [CH 83-1, 23], sau în manuale didactice [CH 90] și [CH 97] și cărți tehnice [CH 89-3].
4. Prezentarea în sinteză comparativă a principalelor metode și procedee cunoscute în literatura de specialitate pentru măsurarea și controlul grosimii SS, a arătat că nu sunt în totalitate suficient de precise sau comode de aplicat în producția de serie a peliculelor subțiri sau a dispozitivelor electronice realizate cu acestea. Pe baza studiului inițiat s-a putut stabili că metoda cuarțului rezonant [CH 84-1] este cea mai potrivită pentru aplicațiile microelectronicii, întrucât se caracterizează prin universalitate și se pretează cel mai bine la automatizarea procesului tehnologic.
5. Pentru a elimina principalul dezavantaj al metodei cuarțului rezonant, legat de înlocuirea traductorului piezoelectric după fiecare depunere s-a procedat la elaborarea unei metode optimale de măsurare și control a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în cadrul aceluiași proces tehnologic, prin generalizarea într-o manieră originală a metodei cuarțului rezonant [CH, 84-3]. Introducerea și utilizarea conceptului de "impedanță acustică" [CH, 89-3] a permis deducerea unei relații exacte de dependență grosime-frecvență (relația 3.9.) care ia în considerație atât influența sarcinilor electrice cât și a tensiunilor elastice care apar la contactul a două materiale de natură diferită, depuse succesiv.
6. Conceperea și realizarea unui traductor grosime-frecvență termostatat de mare sensibilitate, precizie și stabilitate care constituie obiectul certificatului de inovator Nr.1789/1987 [CH 87-1].
7. Conceperea, realizarea și experimentarea unui aparat complex organizat în jurul microcalculatorului MST 8014NS pentru măsurarea și controlul în timp real, a grosimii SS de natură diferită și a vitezei de condensare a moleculelor pe substrat. Soluția prezentată constituie obiectivul brevetului de inventator Nr. 93890/1989 [CH, 89-1]. Experimentat în condiții de laborator, aparatul MGS 01 este utilizat de studenți în cadrul procesului didactic la disciplina

Tehnologie electronică și de cadrele didactice de la Catedra de Electronică Aplicată, în activitatea de cercetare științifică.

8. Conceperea, realizarea și experimentarea unei configurații optinale de sistem automat capabil să conducă, comande și să controleze în timp real, principalii parametri de proces ai unei instalații industriale de obținere a straturilor subțiri prin evaporare termică în vid înalt. Soluția prezentată va fi publicată într-o carte tehnică în curs de apariție.
9. Elaborarea unui program amplu denumit "COMANDĂ, CONDUCERE ȘI CONTROL" în limbaj MS-DOS MACROASSAMBLER A51 V44 și prezentat în ANEXA 5 a lucrării. Dezvoltarea și simularea au fost realizate sub un excelent pachet de emulare al microcontrolerelor din familia 8051/8053 denumit SCOPE-51.
10. Elaborarea și configurarea metodelor și strategiilor de testare a echipamentelor realizate, utilizând atât metode soft cât și hard. Testarea și diagnosticarea "on line" a defecțiunilor în echipamentele electronice moderne constituie una din actualele preocupări didactice ale autorului [CH, 97].

Alte contribuții originale ale autorului în domeniul măsurării și controlului cu precizie a grosimii cu precizie a grosimii SS au fost prezentate de autor la diferite manifestări științifice din țară sau străinătate.

Astfel rezultatele cele mai importante ale tezei au la bază 16 referințe bibliografice publicate de autor, dintre care se remarcă: o carte tehnică, un brevet de inventator, două brevete de inovator, două manuale didactice și 10 lucrări științifice.

Având în vedere contribuțiile teoretice și practice aduse de autor la elaborarea tezei, problema măsurării și controlului cu precizie a grosimii SS de natură diferită depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt, poate fi considerată rezolvată.

Teza de doctorat prezentată a fost definitivată în perioada 1991-1996, dar reprezintă rodul cercetărilor întreprinse de autor în domeniul atractiv al straturilor subțiri pe durata ultimilor zece ani.

Elaborarea tezei a avut loc sub îndrumarea competentă și generoasă a conducătorului științific, Dl. Prof. Dr. Ing. Tiberiu Mureșan, față de care autorul nutrește cele mai frumoase sentimente de stimă, respect și apreciere. Pentru discuțiile utile, sfaturile competente, sugestiile novatoare și încurajările stimulative, care au contribuit substanțial la finalizarea tezei de doctorat îi suntem profund recunoscător.

ANEXA 1

CARACTERISTICILE PRINCIPALELOR MATERIALE UTILIZATE SUB FORMĂ DE STRATURI SUBȚIRI ÎN MICROELECTRONICĂ

Tabelul A1

CARACTERITICI ALE MATERIALELOR DE DEPUNERE STRATURI REZISTIVE

Material	Compoziția (%)	Densitatea (g/cm ³)	Temperatura sursei de evaporare (°C)	Grosimea stratului (Å)	Rezitivitatea (Ω/□)	Coefficientul derivei termice (ppm/°C)
NiCr	50:50	7.6	1600	100	180	±20
NiCr	60:40	8.1	1600	100	170	+50
NiCr	80:20	8.5	1600	100	100	+250
CrSiO	50:50	4.8	1600	100	280	<250
CrSiO	60:40	5.4	1600	100	170	<250
CrSiO	70:30	5.8	1600	100	120	<250

Tabelul A2

CARACTERISTICI ALE MATERIALELOR DE DEPUNERE STRATURI CONDUCTOARE

Material	Grosimea stratului (kÅ)	Densitatea (g/cm ³)	Temperatura de topire (p=10 ⁻³ torr) (°C)	Temperatura de evaporare (p=10 ⁻³ torr) (°C)	Coefficientul derivei termice (ppm/°C)
Au	100	19.3	1063	1465	±20
Ag	100	10.5	961	1047	+50
Al	100	2.7	660	966	+250
Cu	100	8.9	1083	1273	<250
Pb	100	11.3	328	718	<250

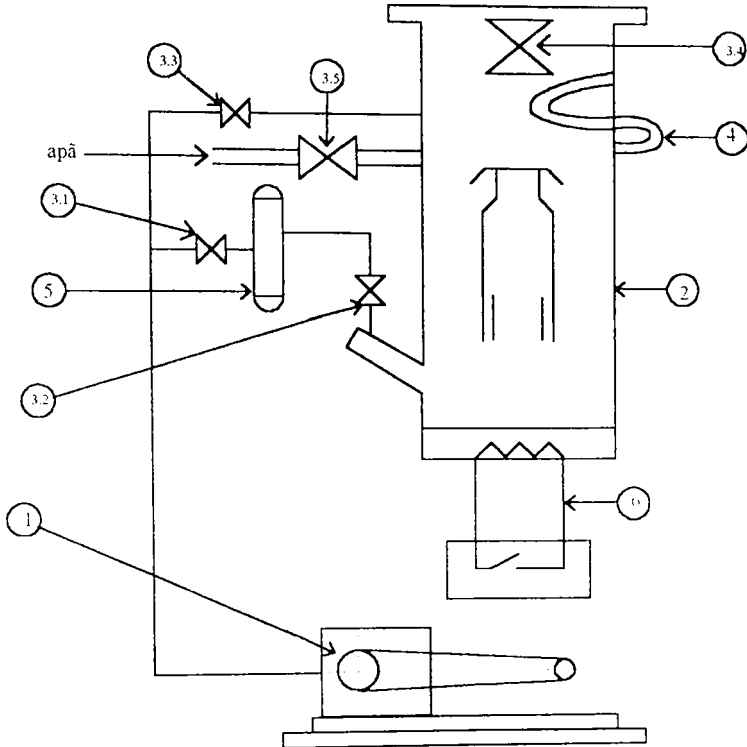
CARACTERISTICI ALE MATERIALELOR DE DEPUNERE STRATURI DIELECTRICE

Material	Rezistivitate ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Capacitatea specifică (pF/cm^2)	Constanta dielectrică	Tangenta unghiului de pierderi (%)	Tensiune de străpungere (MV/cm)	Coefficientul derivei termice ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)
SiO	$10^{12}\div 10^{13}$	10^4	5.6	0.2÷2	1÷2	100
SiO ₂	$10^9\div 10^{12}$	$3\cdot 10^4$	4	0.2	5÷10	100
ZnS ₂	$10^{10}\div 10^{12}$	$4\cdot 10^4$	9	0.5	0.8	400
MgP ₂	$10^9\div 10^{11}$	$4\cdot 10^4$	10	1.0	2÷3	250
Sb ₂ S ₃	$10^{12}\div 10^{13}$	$2\cdot 10^4$	20	0.5	<2	500
TiO ₂	$10^{12}\div 10^{14}$	$(3\div 5)\cdot 10^4$	100	0.1	1	200

CARACTERISTICI ALE SUBSTRATURILOR CERAMICE

Caracteristica	Materialul substratului		
	95% Al ₂ O ₃	99.5% Al ₂ O ₃	99.5% BeO
Presiunea la întindere [kgf/cm^2]	1800÷2500	2400÷2700	980÷1300
Densitatea [g/cm ³]	3.61÷3.7	2.4÷3.4	2.4÷2.6
Căldura specifică [cal/g]	0.105	0.122	0.240
Conductibilitatea termică [$\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}/20^\circ\text{C}$]	0.043	0.075	0.67
Temperatura maximă de lucru [$^\circ\text{C}$]	1700	1750	1850
Constanta dielectrică la 1kHz și 25 $^\circ\text{C}$	9.0	9.4	6.8
Rezistivitatea de volum [$\Omega\cdot\text{cm}^2/\text{cm}$]	$<10^{14}$	$<10^{14}$	$<10^{17}$
Coefficientul de dilatare termică 0-300 $^\circ\text{C}$ [°C ⁻¹]	$6\cdot 10^{-6}$	$6\cdot 10^{-6}$	$7.5\cdot 10^{-6}$
Presiunea la îndoire [kgf/cm^2]	3200÷3500	700÷1600	2460

ANEXA 2



LEGENDA

1. Pompa de vid preliminar $10^3 \dots 10^{-3}$ torr
2. Pompa de difuzie $p < 10^{-3}$ torr
- 3.1; 3.2; 3.3 Robineți de vid preliminar
- 3.4. Robineți de vid înalt
- 3.5 Robinet de răcire apă
4. Trapa de răcire cu apă
5. Vas tampon
6. Reșou electric

Fig. 2.1. Schema agregatului de vid înalt AV 100 500.

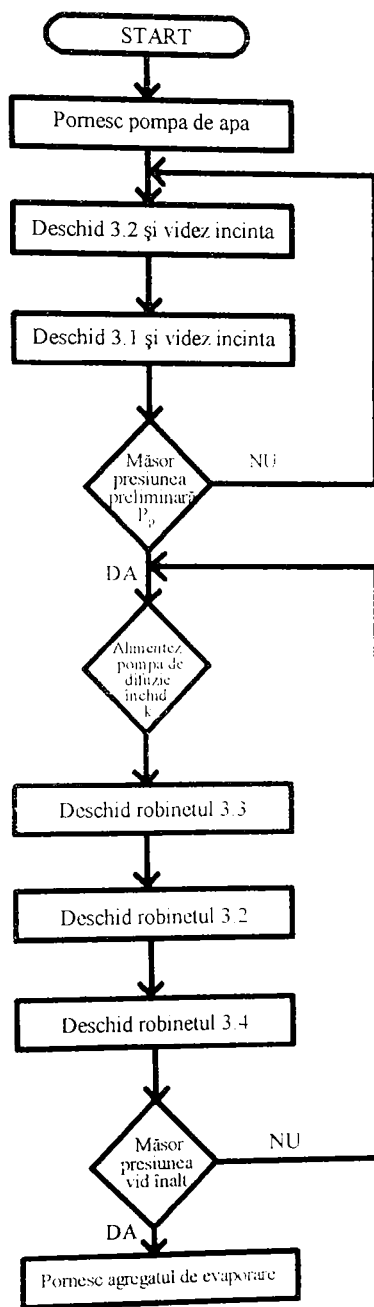


Fig.2.2. Ordinograma de funcționare a agregatului de vid înalt AV 100 500

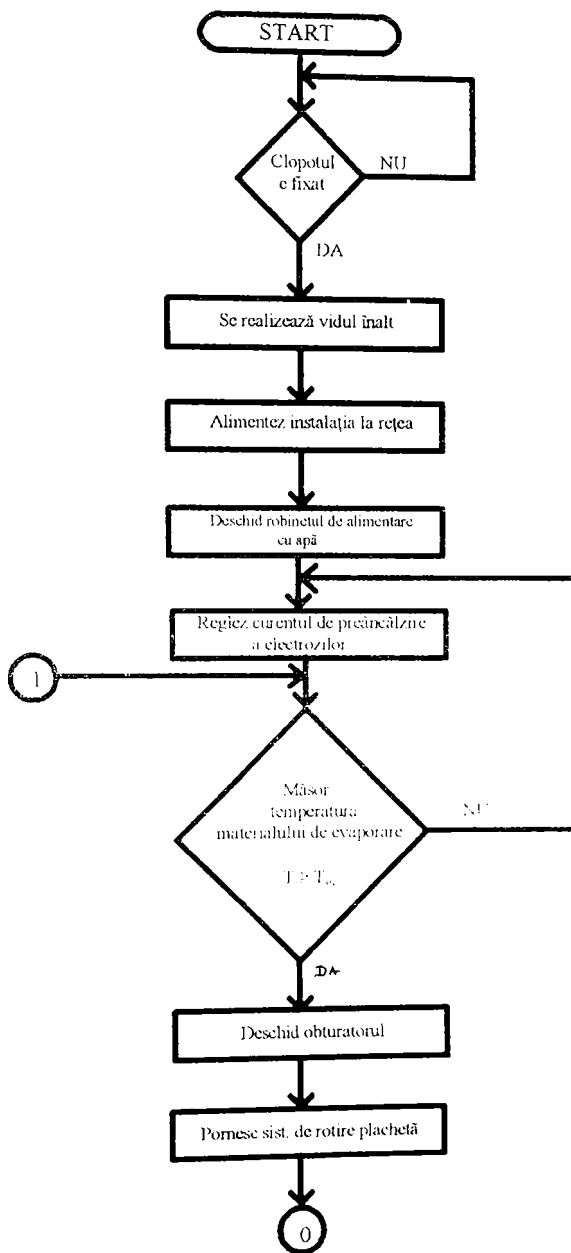


Fig. 2.2.a. Ordinograma de funcționare a agregatului de evaporare AE 100/500

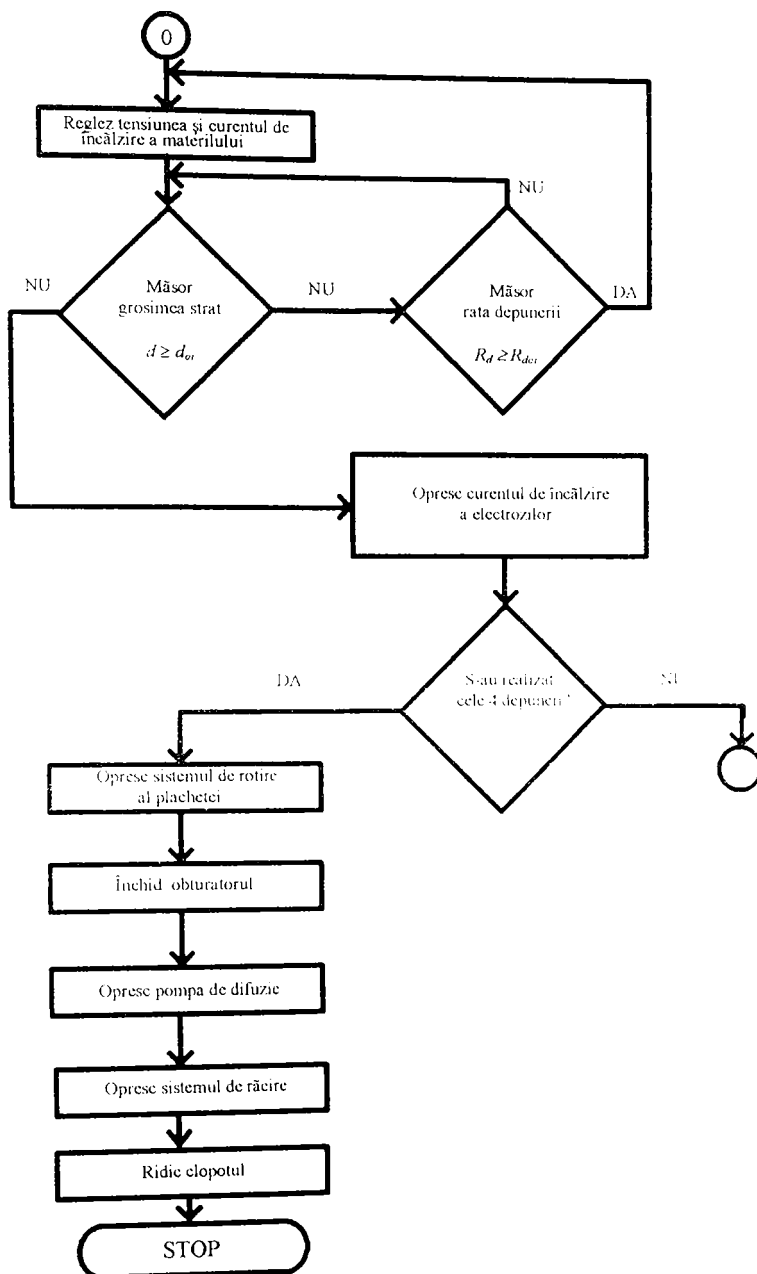
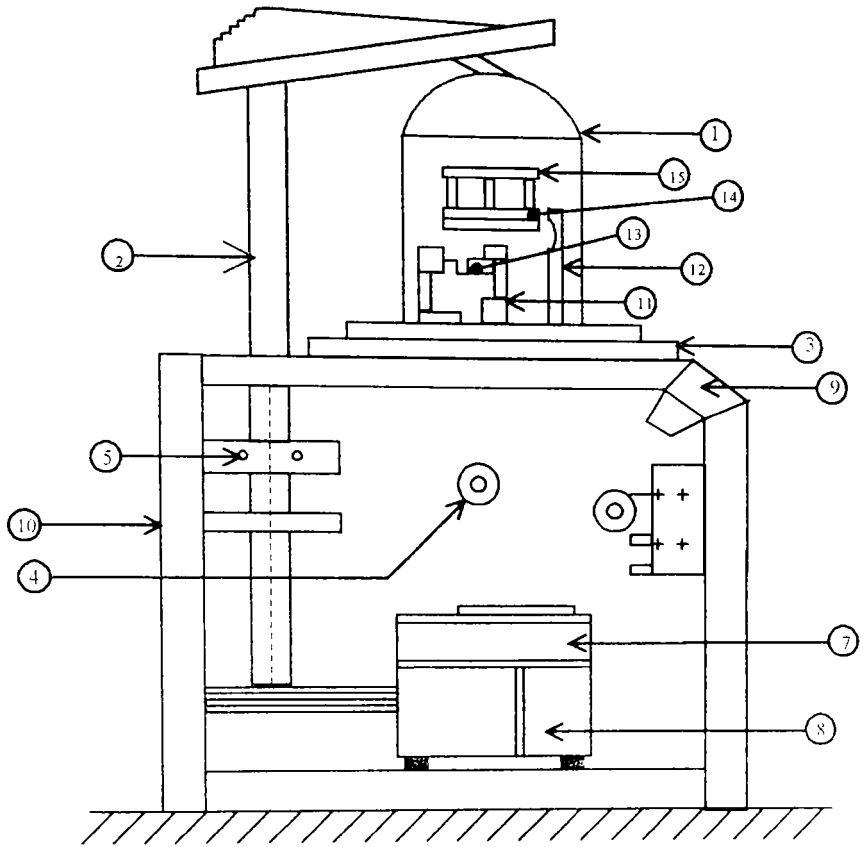


Fig. 2.4.b. Ordinograma de fucținare a agregatului de evaporare AI 100 500



LEGENDA

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. Clopot | 9. Panou cu aparate de măsură |
| 2. Sistem de echilibrare clopot | 10. Cadru suport |
| 3. Platan | 11. Electrozi |
| 4. Racord la agregatul de vid | 12. Obturator |
| 5. Distribuitor pentru apa de răcire a electrozilor | 13. Evaporator |
| 6. Panou cu rele | 14. Suport plachetă |
| 7. Autotransformator | 15. Sistem rotire plachetă |
| 8. Transformator rețea | |

Fig. 2.3. Schema agregatului de evaporare AI 100 500

ANEXA 3

CARACTERISTICILE MICROCONTROLERULUI SAB 80C535

1. Schema bloc și conexiunile la pinii capsulei

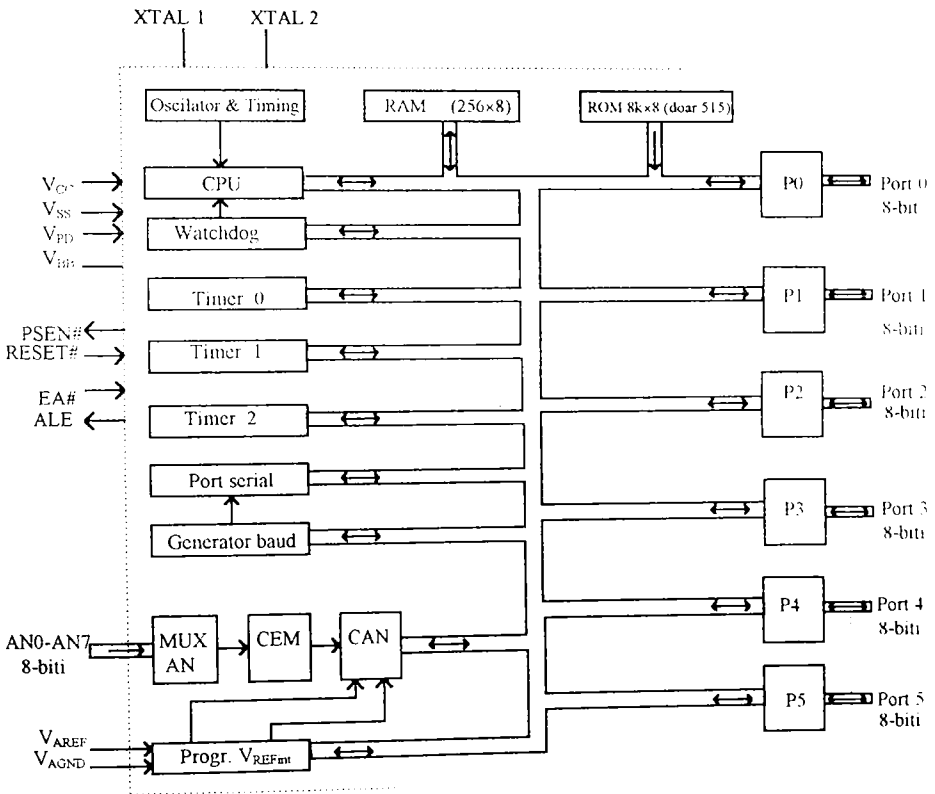
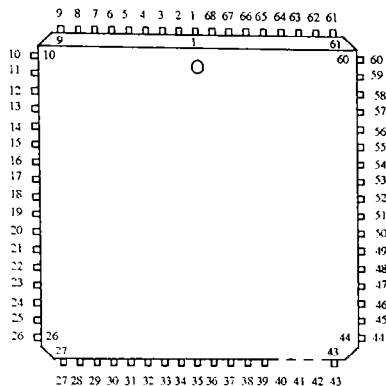


Fig.3.1.Schema bloc a microcontrolerului SAB 80C535.



Legendă:

1- P4.0	24-INT1#/P3.3.	47-P2.6.
2- P4.1.	25-T0/P3.4.	48-P2.7
3- P4.2.	26-T1/P3.5.	49-PSEN#
4- V_{PD}	27-WR#/P3.6.	50-ALE
5- P4.3	28-RD#/P3.7.	51-EA#
6- P4.4	29-T2/P1.7.	52-P0.0.
7- P.4.5	30-CLKOUT/P1.6.	53-P0.1.
8- P4.6.	31-T2EX/P1.5.	54-P0.2.
9- P4.7.	32-INT2#/P1.4.	55-P0.3
10- RESET#	33-CC3/INT6/P1.3.	56-P0.4.
11- V_{AREF}	34-CC2/INT5/P1.2.	57-P0.5.
12- V_{AGND}	35-CC1/INT4/P1.1.	58-P0.6.
13- AN7	36-CC0/INT3#/P1.0	59-P0.7.
14- AN6	37- V_{BB}	60-P5.7.
15- AN5	38- V_{SS}	61-P5.6.
16- AN4	39-XTAL2	62-P5.5.
17- AN3	40-XTAL1	63-P5.4.
18- AN2	41-P2.0.	64-P5.3.
19- AN1	42-P2.1.	65-P5.2.
20- AN0	43-P2.2.	66-P5.1.
21- $R_XD/P3.0.$	44-P2.3.	67-P5.0.
22- $T_XD/P3.1.$	45-P2.4.	68- V_{CC}
23- INT0#/P3.2.	46-P2.5.	

Fig.3.2. Configurația pinilor la capsula microcontrolerului SAB 80C535

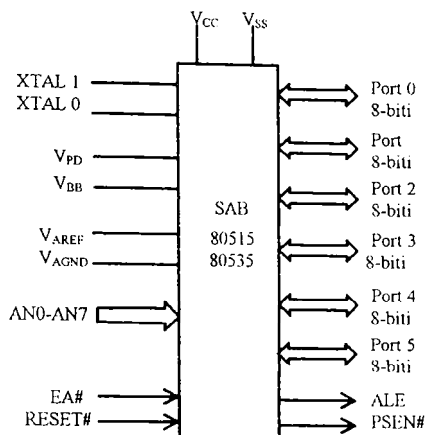


Fig. 3.3. Simbolizarea logică a microcontrolerului SAB 80C535

2. Organizarea memoriei

Memoria este împărțită fizic și funcțional în *memoria de program*-nu dispune de memorie internă ci doar externă, de capacitate maximă 64k și *memoria de date*-care este împărțită în 3 zone distincte din punct de vedere fizic: 128 bytes inferiori, 128 bytes superiori și regiștrii speciali (*Special Function Register - SFR*).

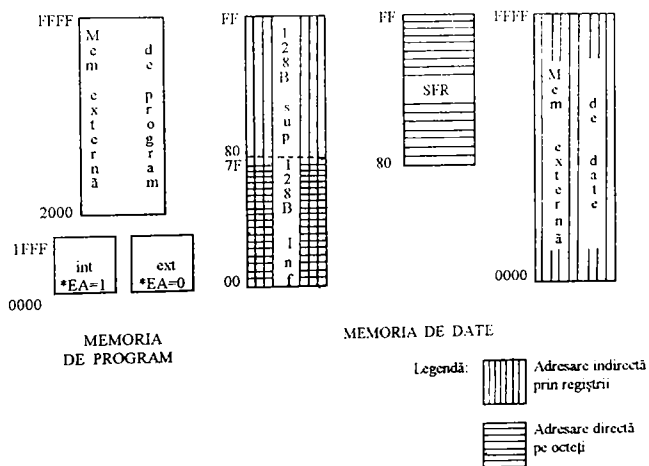


Fig.3.1. Organizarea memoriei.

3. Regiștrii microcontrolerului SAB 80C535

Principial aceștia se pot împății în regiștrii de uz general și regiștrii speciali (*SFR*). Se observă ca, excepție făcând numărătorul de program (*PC*) și cele 4 bancuri de regiștri fără o destinație anume (notați, în cadrul unui banc, *R0...R7*) toți ceilalți se află în zona *SFR*. Acești din urmă, în număr de 41, includ regiștrii aritmetici, de control și de interfațare a unității centrale cu periferice integrate pe chip și sunt prezentați în cele ce urmează. Pentru înțelegerea mai ușoară a mnemonicelor s-a păstrat denumirea din limba engleză.

O bună parte din acești regiștri pot fi întâlniți și la ăprimul membru al familiei, microcontrolerul 8051. Alții sunt complet noi după cum reiese de pe pagina următoare:

BIT	DENUMIRE	SEMNIFICAȚIE	ADRESĂ
DA	P0	Port 0	80h
	SP	Stack pointer	91h
	DPL	Data pointer-low	82h
	DPH	Data pointer-high	83h
	PCON	Power control	87h
DA	TCON	Timer control	87h
	MMOD	Timer mode	89h
	TL0	Timer 0-low	8Ah
	TL1	Timer 0-high	8Bh
	TH0	Timer 1-low	8Ch
	TH1	Timer 1-high	8Dh
DA	P1	Port 1	90h
DA	SCON	Serial port control	98h
	SBUF	Serial port buffer	99h
DA	P2	Port 2	A0h
DA	IEN0	Interrupt enable 0	A8h
	IP0	Interrupt priority 0	A9h
DA	P3	Port 3	B0h
DA	IEN1	Interrupt enable reg. 1	B8h
	IP1	Interrupt priority reg. 1	B8h
DA	IRCON	Interrupt request Control	C0h
	CCEN	Compare/capture enable	C1h
	CCL1	Compare/capture 1-low	C2h
	CCH1	Compare/capture 1-high	C3h
	CCL2	Compare/capture 2-low	C4h
	CCH2	Compare/capture 2-high	C5h
	CCL3	Compare/capture 3-low	C6h
	CCH3	Compare/capture 3-high	C7h

4. Întreruperile microcontrolerului SAB 80C535

Una din trăsăturile definiției ale flexibilității unui procesor este sistemul de întreruperi. Cu cât acesta este mai dezvoltat, cu atât interfața dintre unitatea centrală și mediul înconjurător este mai facilă. Spre deosebire de modelul de bază al familiei, microcontrolerul 8051, SAB 80C535 are considerabil mai multe întreruperi (12 față de 5) și îmbunătățiri apar și în structurarea lor. Înainte de a discuta mai în detaliu, prezentăm succint sistemul de întreruperi sub forma unui tabel:

CEREREA INDICATĂ DE	SURSA	VECTOR
IE0	Întreruperea externă 0	0003h
TF0	Întreruperea de la timer-ul 0	000Bh
IE1	Întreruperea externă 1	0013h
TF1	Întreruperea de la timer-ul 1	001Bh
RI+TI	Întreruperea de la portul serial	0023h
TF2+EX2	Întreruperea de la timer-ul 2	002Bh
IADC	Întreruperea de CAN	0043h
IEX2	Întreruperea externă 0	004Bh
IEX3	Întreruperea externă 0	0053h
IEX4	Întreruperea externă 0	005Bh
IEX5	Întreruperea externă 0	0063h
IEX6	Întreruperea externă 0	006bh

Validarea/invalidarea întreruperilor se face atât individual cât și global, aceasta din urmă fiind prioritară. Regiștrii de validare a întreruperilor sunt doi la SAB 80C535: *IEN0* și *IEN1*.

Registrul *IEN0* are structura:

EAL	WDT	ET2	ES	ET1	EX1	ET0	EX0
-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----

EAL (*ENABLE ALL INTERRUPTS*) - validează global întreruperile

WDT - validează resetarea watchdog-ului

ET2 - validează întreruperea de la timer-ul 2

ES - validează întreruperea de la portul serial (cererea reprezintă rezultatul unui SAU logic între RI și TI)

ET1 - validează întreruperea de la timer-ul 1

EX1 - validează întreruperea externă
ET0 - validează întreruperea de la timer-ul 0
EX0 - validează întreruperea externă 0

Registrul IEN1 cuprinde restul indicatorilor necesari:

EXEN2	SWDT	EX6	EX5	EX4	EX3	EX2	EADC
-------	------	-----	-----	-----	-----	-----	------

EXEN2 - validează întreruperea provenită de la pinul T2EX (timerul 2 reload)
SWDT - validează resetarea watchdog-ului
EX6 - validează întreruperea externă 6
EX5 - validează întreruperea externă 5
EX4 - validează întreruperea externă 4
EX3 - validează întreruperea externă 3
EX2 - validează întreruperea externă 2
EADC - validează întreruperea provenită de la CAN

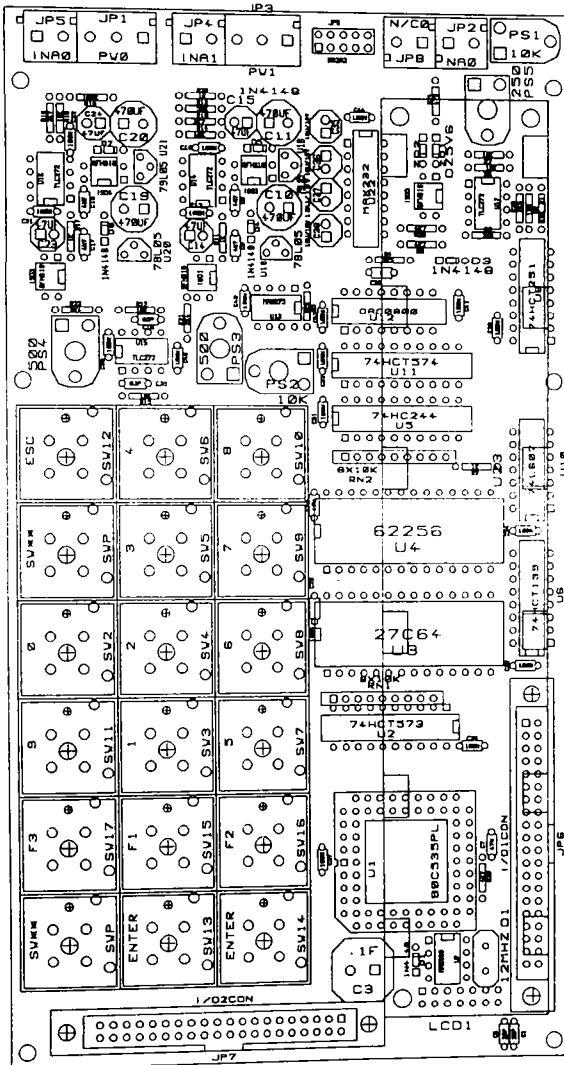
Pentru a departaja cererile simultane de întrerupere, microcontrolerul SAB 80C535 permite asocierea unui nivel de prioritate (din 4 posibile) fiecărei perechi de cereri din tabelul de mai jos. S-a recurs la asocierea cererilor în perechi pentru a restrânge numărul de biți necesar pentru memorarea priorităților. Astfel, fiecare pereche de întreruperi pot avea nivelul 0, 1, 2 sau 3, acesta din urmă fiind cel mai prioritar. O întrerupere de nivel n poate fi întreruptă de una din nivel $n - 1$. Dacă două întreruperi de același nivel survin simultan, ordinea de deservire este stabilită prin proiectarea microcontrolerului și nu poate fi modificată. Stabilitatea efectivă a nivelului se face cu câte 2 biți pentru fiecare pereche. Biții se găsesc în două registre dedicate și denumite *IP* (*Interrupt Priority register*).

Tabelul priorităților întreruperilor

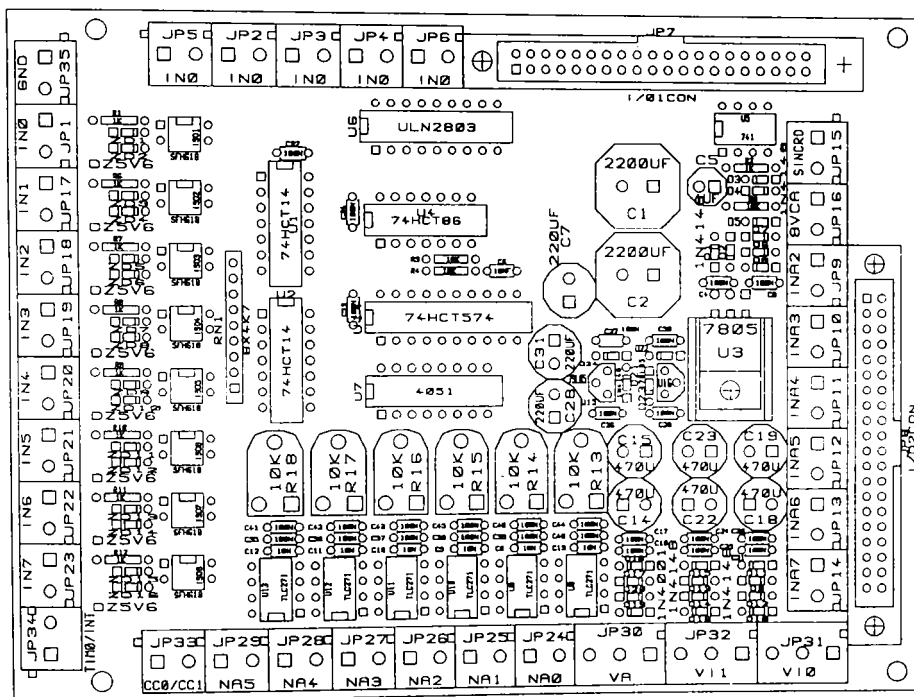
PERECHI	CERERI	BIȚI	NIVEL
IE0	IADC	IP1.0	IP0.0
TF0	IEX2	IP1.1	IP0.1
IE1	IEX3	IP1.2	IP0.2
TF1	IEX4	IP1.3	IP0.3
RI V TI	IEX5	IP1.4	IP0.4
TF2 V EXF2	IEX6	IP1.5	IP0.5

ANEXA 4

1N4148



Placa 1. Dispunerea componentelor sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces pe plăci.



Placa 2. Dispunerea componentelor sistemului automat de conducere, comandă și control a parametrilor de proces pe plăci.

ANEXA 5

PROGRAMUL "COMANDĂ ȘI CONTROL"

MS-DOS MACRO ASSEMBLER A51 V4.4

OBJECT MODULE PLACED IN ADC_TEST.OBJ

ASSEMBLER INVOKED BY: A51 ADC_TEST.ASM DEBUG XREF NOMOD51

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
		1	\$INCLUDE (REG515.INC)
		=1 2	;
		=1 3	; Register Declarations for the 8053S5 Processor
		=1 4	;
		=1 5	; BYTE Register
0080		=1 6	P0 DATA 80H
0090		=1 7	P1 DATA 90H
00A0		=1 8	P2 DATA 0A0H
00B0		=1 9	P3 DATA 0B0H
00E8		=1 10	P4 DATA 0E8H
00F8		=1 11	P5 DATA 0F8H
00D0		=1 12	PSW DATA 0D0H
00E0		=1 13	ACC DATA 0E0H
00F0		=1 14	B DATA 0F0H
0081		=1 15	SP DATA 81H
0082		=1 16	DPL DATA 82H
0083		=1 17	DPH DATA 83H
0087		=1 18	PCON DATA 87H
0088		=1 19	TCON DATA 88H
0089		=1 20	TMOD DATA 89H
008A		=1 21	TL0 DATA 8AH
008B		=1 22	TL1 DATA 8BH
008C		=1 23	TH0 DATA 8CH
008D		=1 24	TH1 DATA 8DH
0098		=1 25	SCON DATA 98H
0099		=1 26	SBUF DATA 99H
		=1 27	
00A8		=1 28	IEN0 DATA 0A8H
00B8		=1 29	IEN1 DATA 0B8H
00A9		=1 30	IP0 DATA 0A9H
00B9		=1 31	IP1 DATA 0B9H
00C0		=1 32	IRCON DATA 0C0H
00C1		=1 33	CCEN DATA 0C1H
00C2		=1 34	CCL1 DATA 0C2H
00C3		=1 35	CCH1 DATA 0C3H
00C4		=1 36	CCL2 DATA 0C4H
00C5		=1 37	CCH2 DATA 0C5H

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
00C6	=1	38	CCL3 DATA 0C6H
00C7	=1	39	CCH3 DATA 0C7H
00C8	=1	40	T2CON DATA 0C8H
00CA	=1	41	CRCL DATA 0CAH
00CB	=1	42	CRCH DATA 0CBH
00CC	=1	43	TL2 DATA 0CCH
00CD	=1	44	TH2 DATA 0CDH
00D8	=1	45	ADCON DATA 0D8H
00D9	=1	46	ADDAT DATA 0D9H
00DA	=1	47	DAPR DATA 0DAH
	=1	48	
	=1	49	; BIT Register
	=1	50	; PSW
00D7	=1	51	CY BIT 0D7H
00D6	=1	52	AC BIT 0D6H
00D5	=1	53	F0 BIT 0D5H
00D4	=1	54	RS1 BIT 0D4H
00D3	=1	55	RS0 BIT 0D3H
00D2	=1	56	OV BIT 0D2H
00D1	=1	57	F1 BIT 0D1H
00D0	=1	58	P BIT 0D0H
	=1	59	; TCON
008F	=1	60	TF1 BIT 8FH
008E	=1	61	TR1 BIT 8EH
008D	=1	62	TF0 BIT 8DH
008C	=1	63	TR0 BIT 8CH
008B	=1	64	IE1 BIT 8BH
008A	=1	65	IT1 BIT 8AH
0089	=1	66	IE0 BIT 89H
0088	=1	67	IT0 BIT 88H
	=1	68	; IEN0
00AF	=1	69	EAL BIT 0AFH
00AE	=1	70	WDT BIT 0AEH
00AD	=1	71	ET2 BIT 0ADH
00AC	=1	72	ES BIT 0ACH
00AB	=1	73	ET1 BIT 0ABH
00AA	=1	74	EX1 BIT 0AAH
00A9	=1	75	ET0 BIT 0A9H
00A8	=1	76	EX0 BIT 0A8H
	=1	77	; IEN1
00BF	=1	78	EXEN2 BIT 0BFH
00BE	=1	79	SWDT BIT 0BEH
00BD	=1	80	EX6 BIT 0BDH
00BC	=1	81	EX5 BIT 0BCH
00BB	=1	82	EX4 BIT 0BBH
00BA	=1	83	EX3 BIT 0BAH
00B9	=1	84	EX2 BIT 0B9H
00B8	=1	85	EADC BIT 0B8H

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
		=1 86 ; P3	
00B7		=1 87 RD	BIT 0B7H
00B6		=1 88 WR	BIT 0B6H
00B5		=1 89 T1	BIT 0B5H
00B4		=1 90 T0	BIT 0B4H
00B3		=1 91 INT1	BIT 0B3H
00B2		=1 92 INT0	BIT 0B2H
00B1		=1 93 TXD	BIT 0B1H
00B0		=1 94 RXD	BIT 0B0H
		=1 95 ; SCON	
009F		=1 96 SM0	BIT 9FH
009E		=1 97 SM1	BIT 9EH
009D		=1 98 SM2	BIT 9DH
009C		=1 99 REN	BIT 9CH
009B		=1 100 TB8	BIT 9BH
009A		=1 101 RB8	BIT 9AH
0099		=1 102 TI	BIT 99H
0098		=1 103 RI	BIT 98H
		=1 104 ; T2CON	
00CF		=1 105 T2PS	BIT 0CFH
00CE		=1 106 I3FR	BIT 0CEH
00CD		=1 107 I2FR	BIT 0CDH
00CC		=1 108 T2R1	BIT 0CCH
00CB		=1 109 T2R0	BIT 0CBH
00CA		=1 110 T2CM	BIT 0CAH
00C9		=1 111 T2I1	BIT 0C9H
00C8		=1 112 T2I0	BIT 0C8H
		=1 113 ; ADCON	
00DF		=1 114 BD	BIT 0DFH
00DE		=1 115 CLK	BIT 0DEH
00DC		=1 116 BSY	BIT 0DCH
00DB		=1 117 ADM	BIT 0DBH
00DA		=1 118 MX2	BIT 0DAH
00D9		=1 119 MX1	BIT 0D9H
00D8		=1 120 MX0	BIT 0D8H
		=1 121 ; IRCON	
00C7		=1 122 EXF2	BIT 0C7H
00C6		=1 123 TF2	BIT 0C6H
00C5		=1 124 IEX6	BIT 0C5H
00C4		=1 125 IEX5	BIT 0C4H
00C3		=1 126 IEX4	BIT 0C3H
00C2		=1 127 IEX3	BIT 0C2H
00C1		=1 128 IEX2	BIT 0C1H
00C0		=1 129 IADC	BIT 0C0H
		130	
		131	
C000		132 W_COM	EQU 0C000H
C001		133 W_DATA	EQU 0C001H

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
C002		134	R_COM EQU 0C002H
C003		135	R_DATA EQU 0C003H
		136	
80FE		137	R0_TAS EQU 080FEH
80FD		138	R1_TAS EQU 080FDH
80FB		139	R2_TAS EQU 080FBH
80F7		140	R3_TAS EQU 080F7H
000B		141	OK EQU 11
000C		142	UP EQU 12
000D		143	DN EQU 13
000E		144	ESC EQU 14
000F		145	PR EQU 15
0003		146	KEY_HOLD EQU 03
0010		147	KEY_IGN EQU 16
		148	
0001		149	CLS EQU 01H
0010		150	C_LEFT EQU 10H
000C		151	C_OFF EQU 0CH
000E		152	C_ON EQU 0EH
0008		153	NR_IMP EQU 08
0030		154	PR_P EQU 30H ;PRESIUNE 1
0080		155	PR_I EQU 80H ;PRESIUNE 2
		156	
		157	DIS_MES MACRO MES ;MACRO AFISARE MESAJ
		158	MOV A,#CLS
		159	CALL COM_DIS
		160	MOV DPTR,#MES
		161	CALL AFIS
		162	ENDM
		163	
		164	DEL_TIM MACRO VAL ;MACRO INIRZIERI INTRE
0-65535 uS		165	MOV TL0,#LOW (65535D-VAL)
		166	MOV TH0,#HIGH (65535D-VAL)
		167	SETB TR0
		168	JNB TF0,\$
		169	ANL TCON,#11001111B
		170	ENDM
		171	
00FF		172	ON_FIRE BIT P5.7
	173		
0020		174	FLAGS EQU 20H ;FLAG-URI SISTEM
		175	
		176	DSEG AT 40H
0040		177	TEMP: DS 01H ;VARIABILA TEMPORARA
0041		178	D_PRESENT: DS 01H ;VARIABILA D
0042		179	STRAT: DS 01H ;STATUL CURENT

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0043	STRATURJ	180	NR_STR: DS 01H ;NUMAR PRESCRIS DE
0044		181	VAL: DS 01H ;
0045		182	INT: DS 01H ;INTENSITATE CURENT
0046		183	KEY: DS 01H ;LOCATIE TASTA
0047		184	P_KEY: DS 01H ;
0048		185	KEY_INH: DS 01H ;
		186	
		187	CSEG AT 0
		188	USING 0
0000	020057	189	LJMP BEGIN
		190	
0003	434F4E45	191	MES1: DB 'CONECTARE ALIM',0
0007	43544152		
000B	4520414C		
000F	494D2E00		
0013	504F524E	192	MES2: DB 'PORNIRE POMPA 1',0
0017	49524520		
001B	504F4D50		
001F	41203100		
0023	504F524E	193	MES3: DB 'PORNIRE POMPA 2',0
0027	49524520		
002B	504F4D50		
002F	41203200		
0033	44455055	194	MES4: DB 'DEPUNERE STRAT',0
0037	4E455245		
003B	20535452		
003F	41542000		
0043	4E554D41	195	MES5: DB 'NUMAR STR>',0
0047	52205354		
004B	523E00		
004E	47524F53	196	MES6: DB 'GROSIME>',0
0052	494D453E		
0056	00		
		197	
0057	758170	198	BEGIN: MOV SP,#70H ;STIVA LA 70H
005A	7400	199	MOV A,#00H
005C	F588	200	MOV TCON,A
005E	F589	201	MOV TMOD,A
0060	F5F0	202	MOV B,A
0062	F58C	203	MOV TH0,A
0064	F58A	204	MOV TL0,A
0066	F58D	205	MOV TH1,A
0068	F58B	206	MOV TL1,A
006A	C0E0	207	PUSH ACC
006C	D0D0	208	POP PSW
006E	900000	209	MOV DPTR,#0
0071	F8	210	MOV R0,A

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0072	7F7F	211	MOV R7,#7FH ;STERG RAM INTERN
0074	B80702	212	M_CL: CJNE R0,#07,M_CLR
0077	8001	213	SJMP M_SKR7
0079	F6	214	M_CLR: MOV @R0,A
007A	08	215	M_SKR7: INC R0
007B	DFF7	216	DJNZ R7,M_CL
		217	
007D	D28A	218	SETB IT1 ;FRONT CAZATOR AL IE1
007F	758911	219	MOD 1 (PE 16 BITI) MOV TMOD,#11H ;TIMER 0 SI 1 IN
0082	D2AA	220	SETB EX1 ;VALIDARE
			INTRERUPERE EXTERNA 1
0084	C28B	221	CLR IE1 ;STERG CERERILE DE
			INTRERUPERE EXISTENTE
		222	
0086	90C000	223	MOV DPTR,#W_COM ;INITIALIZARE
			AFISAJ
0089	7438	224	MOV A,#38H
		225	DEL_TIM 20000D
008B	758ADF	226+1	MOV TL0,#LOW (65535D-20000D)
008E	758CB1	227+1	MOV TH0,#HIGH (65535D-20000D)
0091	D28C	228+1	SETB TR0
0093	308DFD	229+1	JNB TF0,\$
0096	5388CF	230+1	ANL TCON,#11001111B
0099	F0	231	MOVX @DPTR,A
		232	DEL_TIM 6000D
009A	758A8F	233+1	MOV TL0,#LOW (65535D-6000D)
009D	758CE8	234+1	MOV TH0,#HIGH (65535D-6000D)
00A0	D28C	235+1	SETB TR0
00A2	308DFD	236+1	JNB TF0,\$
00A5	5388CF	237+1	ANL TCON,#11001111B
00A8	F0	238	MOVX @DPTR,A
		239	DEL_TIM 1000D
00A9	758A17	240+1	MOV TL0,#LOW (65535D-1000D)
00AC	758CFC	241+1	MOV TH0,#HIGH (65535D-1000D)
00AF	D28C	242+1	SETB TR0
00B1	308DFD	243+1	JNB TF0,\$
00B4	5388CF	244+1	ANL TCON,#11001111B
00B7	F0	245	MOVX @DPTR,A
		246	DEL_TIM 100D
00B8	758A9B	247+1	MOV TL0,#LOW (65535D-100D)
00BB	758CFF	248+1	MOV TH0,#HIGH (65535D-100D)
00BE	D28C	249+1	SETB TR0
00C0	308DFD	250+1	JNB TF0,\$
00C3	5388CF	251+1	ANL TCON,#11001111B
		252	
00C6	7438	253	MOV A,#38H

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
00C8	31FF	254	ACALL COM_DIS
00CA	7408	255	MOV A,#08H
00CC	31FF	256	ACALL COM_DIS
00CE	7401	257	MOV A,#01H
00D0	31FF	258	ACALL COM_DIS
00D2	740E	259	MOV A,#0EH
00D4	31FF	260	ACALL COM_DIS
00D6	7406	261	MOV A,#06H
00D8	31FF	262	ACALL COM_DIS
00DA	740C	263	MOV A,#C_OFF
00DC	31FF	264	ACALL COM_DIS
		265	
00DE	D2AF	266	SETB EAL ;VALIDARE
INTRERUPERI EXTERNE			
		267	
00E0	754000	268	MOV TEMP,#0
00E3		269	DIS_MES MES5
00E3	7401	270+1	MOV A,#CLS
00E5	1201FF	271+1	CALL COM_DIS
00E8	900043	272+1	MOV DPTR,#MES5
00EB	1201DC	273+1	CALL AFIS
00EE	E543	274	MOV A,NR_STR
00F0	F540	275	MOV TEMP,A
00F2	12022B	276	CALL WR_CH
00F5	120261	277	CALL READ_VAL
00F8	854043	278	MOV NR_STR,TEMP
		279	DIS_MES MES6
00FB	7401	280+1	MOV A,#CLS
00FD	1201FF	281+1	CALL COM_DIS
0100	90004E	282+1	MOV DPTR,#MES6
0103	1201DC	283+1	CALL AFIS
0106	E541	284	MOV A,D_PRES
0108	F540	285	MOV TEMP,A
010A	12022B	286	CALL WR_CH
010D	120261	287	CALL READ_VAL
0110	854041	288	MOV D_PRES,TEMP
		289	DEL_TIM 20000
0113	758ADF	290+1	MOV TL0,#LOW (65535D-20000)
0116	758CB1	291+1	MOV TH0,#HIGH (65535D-20000)
0119	D28C	292+1	SETB TRO
011B	308DFD	293+1	JNB TF0,\$
011E	5388CF	294+1	ANL TCON,#11001111B
		295	DIS_MES MES1
0121	7401	296+1	MOV A,#CLS
0123	1201FF	297+1	CALL COM_DIS
0126	900003	298+1	MOV DPTR,#MES1
0129	1201DC	299+1	CALL AFIS

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
012C	C2F8	300	CLR P5.0 ;CONECTEZ
ALIMENTARE			
012E	12020E	01	CALL DELAY
		302	DIS_MES MES2
0131	7401	303+1	MOV A,#CLS
0133	1201FF	304+1	CALL COM_DIS
0136	900013	305+1	MOV DPTR,#MES2
0139	1201DC	306+1	CALL AFIS
013C	C2F9	307	CLR P5.1 ;SE PORNESTE POMPA
DE VID (RL1)			
013E	C2FA	308	CLR P5.2 ;DESCHID ROBINETUL
DE VID (EV1)			
0140	12020E	309	CALL DELAY
		310	DIS_MES MES3
0143	7401	311+1	MOV A,#CLS
0145	1201FF	312+1	CALL COM_DIS
0148	900023	313+1	MOV DPTR,#MES3
014B	1201DC	314+1	CALL AFIS
014E	7800	315	P_LOOP: MOV R0,#0 ;VERIFIC DACA Pp>Pop
0150	1201CC	316	CALL READ_ADC
0153	B43001	317	CJNE A,#PR_P,P_GT
0156	D3	318	SETB C ;FORTEZ IESIREA
0157	50F5	319	P_GT: JNC P_LOOP
0159	D2FA	320	SETB P5.2 ;DECONNECTAM (EV1)
015B	C2FB	321	CLR P5.3 ;CONNECTAM (EV2)
015D	C2FC	322	CLR P5.4 ;PORNESC POMPA DE
VID INALT (RL2)			
015F	7800	323	P1_LOOP: MOV R0,#0 ;VERIFIC DACA Pi>Poi
0161	1201CC	324	CALL READ_ADC
0164	B48001	325	CJNE A,#PR_I,P1_GT
0167	D3	326	SETB C ;FORTEZ IESIREA
0168	50F5	327	P1_GT: JNC P1_LOOP
016A	754200	328	MOV STRAT,#0
016D		329	S_LOOP: DIS_MES MES4
016D	7401	330+1	MOV A,#CLS
016F	1201FF	331+1	CALL COM_DIS
0172	900033	332+1	MOV DPTR,#MES4
0175	1201DC	333+1	CALL AFIS
0178	E542	334	MOV A,STRAT
017A	12023A	335	CALL WR_HEX
017D	C2FD	336	CLR P5.5 ;CONNECTAM EV3
017F	C2FE	337	CLR P5.6 ; "-" RL3
0181	C290	338	CLR P1.0 ; "-" RL4
0183	C291	339	CLR P1.1 ; "-" C2
0185	C292	340	CLR P1.2 ; "-" RL5
0187	754563	341	MOV INT,#99 ;PORNIM INCALZIRE CU
CURENT MAXIM			
018A	D207	342	SETB FLAGS.7

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
018C	12020E	343	CALL DELAY
018F	75F000	344	MOV B,#0 ;d0=0
0192	85F044	345	D_LOOP: MOV VAL,B
0195	12020E	346	CALL DELAY ;PAUZA 1s
0198	7801	347	MOV R0,#01 ;CANAL 1 ADC
019A	1201CC	348	CALL READ_ADC
019D	F5F0	349	MOV B,A
019F	C3	350	CLR C
01A0	9544	351	SUBB A,VAL ;CALCULEZ rd
01A2	B40A01	352	CJNE A,#0AH,CH_LT ;VERIFIC DACA
rd<VALOARE PRAG			
01A5	C3	353	CLR C
01A6	40EA	354	CH_LT: JC D_LOOP
01A8	E545	355	MOV A,INT
01AA	C3	356	CLR C
01AB	9403	357	SUBB A,#03 ;MICSOREZ CURENTUL
01AD	F545	358	MOV INT,A
01AF	E5F0	359	MOV A,B
01B1	B541DE	360	CJNE A,D_PRES,D_LOOP ;VERIFIC DACA
Di<D_PRES (VALOARE PRESCRISA)			
01B4	C207	361	CLR FLAGS.7 ;OPRESC CURENTUL
01B6	D290	362	SETB P1.0 ;DECONNECTEZ RL4 SI
EV3			
01B8	D2FD	363	SETB P5.5
01BA	C293	364	CLR P1.3 ;ROTESC MATERIALUL
01BC	0542	365	INC STRAT ;INCREMENTEZ
NUMARUL DE STRATURI			
01BE	E542	366	MOV A,STRAT
01C0	B543AA	367	CJNE A,NR_STR,S_LOOP ;VERIFIC DACA
SA ATINS NUMARUL PRESCRIS			
01C3	D2FD	368	SETB P5.5 ;DECONNECTEZ EV3, EV2,
C1			
01C5	D2FB	369	SETB P5.3
01C7	D2F8	370	SETB P5.0
01C9	0200E3	371	JMP M_LOOP ;REVIN LA INITIALIZARE
372			
01CC		373	READ_ADC: ;IN R0 AM CANALUL
ADC			
01CC	E5D8	374	MOV A,ADCON
01CE	54E0	375	ANL A,#111100000B
01D0	28	376	ADD A,R0
01D1	F5D8	377	MOV ADCON,A
01D3	75DA00	378	MOV DAPR,#0
01D6	20DCF0	379	JB BSY,\$
01D9	E5D9	380	MOV A,ADDAT ;IN ACC IES CU
VALOAREA MASURATA			
01DB	22	381	RET
382			

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
01DC	C0E0	383	AFIS: PUSH ACC ;SUBRUTINA AFISARE
01DE	E8	384	MOV A,R0 ;CARE SE AFLA IN
01DF	C0E0	385	PUSH ACC ;LA ADRESA
01E1	7800	386	MOV R0,#0
01E3	12024D	387	A_LOOP: CALL WAIT ;VERIFICA DISPLAY BUSY
01E6	E8	388	MOV A,R0
01E7	93	389	MOVC A,@A+DPTR
01E8	600F	390	JZ A_OUT
01EA	C082	391	PUSH DPL
01EC	C083	392	PUSH DPH
01EE	90C001	393	MOV DPTR,#W_DATA ;ADRESA DE
01F1	F0	394	MOVX @DPTR,A
01F2	D083	395	POP DPH
01F4	D082	396	POP DPL
01F6	08	397	INC R0
01F7	80EA	398	SJMP A_LOOP
01F9	D0E0	399	A_OUT: POP ACC
01FB	F8	400	MOV R0,A
01FC	D0E0	401	POP ACC
01FE	22	402	RET ;NU SE DISTRUGE NIMIC
01FF	C083	403	
0201	C082	404	COM_DIS: PUSH DPH ;SUBRUTINA DE
0203	90C000	405	PUSH DPL ;COMENZILOR CATRE
0206	F0	406	MOV DPTR,#W_COM ;VALOAREA SE
0207	514D	407	MOVX @DPTR,A
0209	D082	408	ACALL WAIT
020B	D083	409	POP DPL
020D	22	410	POP DPH
		411	RET ;NU SE DISTRUGE NIMIC
		412	
020E	C0E0	413	DELAY: PUSH ACC ;SUBRUTINA INTIRZIERE
0210	EF	414	MOV A,R7
0211	C0E0	415	PUSH ACC
0213	7F32	416	MOV R7,#50
0215		417	D_LP: DEL_TIM 20000
0218	758ADF	418+1	MOV TL0,#LOW (65535D-20000)
021B	D28C	419+1	MOV TH0,#HIGH (65535D-20000)
021D	308DFD	420+1	SETB TR0
		421+1	JNB TF0,\$

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0220	5388CF	422+1	ANL TCON,#11001111B
0223	DFFO	423	DJNZ R7,D_LP
0225	D0E0	424	POP ACC
0227	FF	425	MOV R7,A
0228	D0E0	426	POP ACC
022A	22	427	RET
		428	
022B	C083	429	WR_CH: PUSH DPH ;SUBRUTINA DE
AFISARE A UNUI			
022D	C082	430	PUSH DPL ;CARACTER. VALOARE
IN ACC			
022F	90C001	431	MOV DPTR,#W_DATA
0232	F0	432	MOVX @DPTR,A
0233	514D	433	ACALL WAIT
0235	D082	434	POP DPL
0237	D083	435	POP DPH
0239	22	436	RET ;NU SE DISTRUGE NIMIC
		437	
023A	C0F0	438	WR_HEX: PUSH B
023C	75F010	439	MOV B,#10H ;SUBRUTINA DE
SCRIERE A CIFRELOR			
023F	84	440	DIV AB ;VALOAREA SE
INTRODUCE			
0240	2430	441	ADD A,#0' ;IN ACC
0242	512B	442	CALL WR_CH
0244	E5F0	443	MOV A,B
0246	2430	444	ADD A,#0'
0248	512B	445	ACALL WR_CH
024A	D0F0	446	POP B
024C	22	447	RET
		448	
024D	C0E0	449	WAIT: PUSH ACC ;ASTEPTARE ! DISPLAY
BUSY !			
024F	C083	450	PUSH DPH ;NU DISTRUGE NIMIC
0251	C082	451	PUSH DPL
0253	90C002	452	MOV DPTR,#R_COM
0256	E0	453	WLOOP: MOVX A,@DPTR
0257	20E7FC	454	JB ACC.7,WLOOP
025A	D082	455	POP DPL
025C	D083	456	POP DPH
025E	D0E0	457	POP ACC
0260	22	458	RET
		459	
0261	E8	460	READ_VAL: MOV A,R0 ;SUBRUTINA
INTRODUCERE			
0262	C0E0	461	PUSH ACC ;VALORI NUMERICE
0264	E9	462	MOV A,R1 ;SALVEZ R0 SI R7
0265	C0E0	463	PUSH ACC

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0267	EF	464	MOV A,R7
0268	C0E0	465	PUSH ACC
026A	7840	466	MOV R0,#TEMP ;R0 ESTE POINTER LA TEMP
026C	AF40	467	MOV R7,TEMP ;SALVEZ FOSTA VALOARE A LUI
026E	E546	468	RV_BACK: MOV A,KEY ;TEMP IN R7
0270	B40E05	469	CJNE A,#ESC,RV_NO_ESC ;DACA KEY=ESC IES FARA A MODIFICA
0273	8F40	470	MOV TEMP,R7 ;TEMP
0275	D3	471	SETB C
0276	8004	472	SJMP RV_EXIT
0278	B40B0B	473	RV_NO_ESC: CJNE A,#OK,RV_NO_OK ;DACA KEY=OK SALVEZ IN TEMP
027B	C3	474	CLR C
027C	D0E0	475	RV_EXIT: POP ACC ;REFAC R0 SI R7 SI IES !
027E	FF	476	MOV R7,A
027F	D0E0	477	POP ACC
0281	F9	478	MOV R1,A
0282	D0E0	479	POP ACC
0284	F8	480	MOV R0,A
0285	22	481	RET ;NOUA VALOARE
0286	B40F02	482	RV_NO_OK: CJNE A,#PR,RV_SK_PROG ;DACA KEY=PR IGNOR TASTA
0289	803B	483	SJMP RV_PROG
028B	B40C0A	484	RV_SK_PROG: CJNE A,#UP,RV_FAR1 ;DACA KEY=UP VERIFIC DACA
028E	B66304	485	CJNE @R0,#63H,RV_99 ;(TEMP)=99. DACA DA (TEMP)=0
0291	7600	486	MOV @R0,#00H
0293	8024	487	SJMP RV_FAR3
0295	06	488	RV_99: INC @R0 ;DACA NU (TEMP)=(TEMP)+1
0296	8021	489	SJMP RV_FAR3
0298	B40D0A	490	RV_FAR1: CJNE A,#DN,RV_FAR2 ;DACA KEY=DN VERIFIC DACA
029B	B60004	491	CJNE @R0,#00H,RV_00 ;(TEMP)=0. DACA DA (TEMP)=99
029E	7663	492	MOV @R0,#63H
02A0	8017	493	SJMP RV_FAR3
02A2	16	494	RV_00: DEC @R0 ;DACA NU (TEMP)=(TEMP)-1
02A3	8014	495	SJMP RV_FAR3
02A5	540F	496	RV_FAR2: ANL A,#0FH ;AVEM TASTA CU CIFRA.
02A7	C0E0	497	PUSH ACC
02A9	E6	98	MOV A,@R0
02AA	75F00A	499	MOV B,#10D

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
		536	
02F0	C082	537	SCAN: PUSH DPL ;SUBRUTINA DE
SCANARE A			
02F2	C083	538	PUSH DPH ;TASTATURII
02F4	9080FE	539	MOV DPTR,#R0_TAS ;DISTRUGE ACC
02F7	E4	540	CLR A
02F8	93	541	MOVC A,@A+DPTR ;CITESC RINDUL 0
02F9	540F	542	ANL A,#0FH ;MASCHEZ SI
COMPLEMENTEZ VALOAREA			
02FB	640F	543	XRL A,#0FH ;CITITA
02FD	601E	544	JZ S_FAR ;DACA AM CITIT 0FH
TREC LA RINDUL URMATOR			
02FF	B40804	545	CJNE A,#08H,S_ESC ;VERIFIC PENTRU
FIECARE BIT DE			
0302	740E	546	MOV A,#ESC ;DATE. DACA SINT MAI
MULTI			
0304	8013	547	SJMP S_OUT0 ;IGNOR TASTA
0306	B40404	548	S_ESC: CJNE A,#04H,S_7
0309	7407	549	MOV A,#07H
030B	800C	550	SJMP S_OUT0
030D	B40204	551	S_7: CJNE A,#02H,S_4
0310	7404	552	MOV A,#04H
0312	8005	553	SJMP S_OUT0
0314	B40106	554	S_4: CJNE A,#01H,S_FAR
0317	7401	555	MOV A,#01H
0319	D200	556	S_OUT0: SETB FLAGS.0 ;AM RECUNOSCU T O
TASTA			
031B	F546	557	MOV KEY,A ;O INTRODUC IN KEY
031D	9080FD	558	S_FAR: MOV DPTR,#R1_TAS
0320	E4	559	CLR A
0321	93	560	MOVC A,@A+DPTR
0322	540F	561	ANL A,#0FH
0324	640F	562	XRL A,#0FH
0326	6021	563	JZ S_FAR1
0328	B40804	564	CJNE A,#8,S_0
032B	7400	565	MOV A,#00H
032D	8013	566	SJMP S_OUT1
032F	B40404	567	S_0: CJNE A,#04H,S_8
0332	7408	568	MOV A,#08H
0334	800C	569	SJMP S_OUT1
0336	B40204	570	S_8: CJNE A,#02H,S_5
0339	7405	571	MOV A,#05H
033B	8005	572	SJMP S_OUT1
033D	B40109	573	S_5: CJNE A,#01H,S_FAR1
0340	7402	574	MOV A,#02H
0342	100004	575	S_OUT1: JBC FLAGS.0,S_FAR1 ;VERIFIC DACA NU
A POST TASTA			

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0345	D200	576	SETB FLAGS.0 ;APASATA PE RINDUL
	PRECEDENT		
0347	F546	577	MOV KEY,A
0349	9080FB	578	S_FAR1: MOV DPTR,#R2_TAS ;ETC.
034C	E4	579	CLR A
034D	93	80	MOVC A,@A+DPTR
034E	540F	581	ANL A,#0FH
0350	640F	582	XRL A,#0FH
0352	6021	583	JZ S_FAR2
0354	B40804	584	CJNE A,#8,S_OK
0357	740C	585	MOV A,#UP
0359	8013	586	SJMP S_OUT2
035B	B40404	587	S_OK: CJNE A,#04H,S_9
035E	7409	588	MOV A,#09H
0360	800C	589	SJMP S_OUT2
0362	B40204	590	S_9: CJNE A,#02H,S_6
0365	7406	591	MOV A,#06H
0367	8005	592	SJMP S_OUT2
0369	B40109	593	S_6: CJNE A,#01H,S_FAR2
036C	7403	594	MOV A,#03H
036E	100004	595	S_OUT2: JBC FLAGS.0,S_FAR2
0371	D200	596	SETB FLAGS.0
0373	F546	597	MOV KEY,A
0375	9080F7	598	S_FAR2: MOV DPTR,#R3_TAS
0378	E4	599	CLR A
0379	93	600	MOVC A,@A+DPTR
037A	540F	601	ANL A,#0FH
037C	640F	602	XRL A,#0FH
037E	6021	603	JZ S_FAR3
0380	B40804	604	CJNE A,#8,S_OK1
0383	740B	605	MOV A,#OK
0385	8013	606	SJMP S_OUT3
0387	B40404	607	S_OK1: CJNE A,#04H,S_DN
038A	740B	608	MOV A,#OK
038C	800C	609	SJMP S_OUT3
038E	B40204	610	S_DN: CJNE A,#02H,S_UP
0391	740F	611	MOV A,#PR
0393	8005	612	SJMP S_OUT3
0395	B40109	613	S_UP: CJNE A,#01H,S_FAR3
0398	740D	614	MOV A,#DN
039A	100004	615	S_OUT3: JBC FLAGS.0,S_FAR3
039D	D200	616	SETB FLAGS.0
039F	F546	617	MOV KEY,A
03A1	D083	618	S_FAR3: POP DPH
03A3	D082	619	POP DPL
03A5	22	620	RET
		621	
03A6		622	FIRE: ;SUBROUTINA DE APRINDERE TIRISTOARE

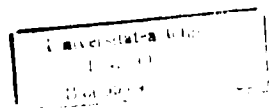
LOC	OBJ	LINE	SOURCE
03A6	7F08	623	MOV R7,#NR_IMP
03A8	C2FF	624	CLR ON_FIRE
03AA	7816	625	F_LOOP: MOV R0,#16H ;FAC INTIRZIERE INTRE
IMPULSURI			
03AC	D8FE	626	DJNZ R0,\$
03AE	B2FF	627	CPL ON_FIRE ;COMPLEMENEZ ON_FIRE
03B0	DFE8	628	DJNZ R7,F_LOOP ;REPET PINA LA
NUMARUL DE IMPULSURI			
03B2	D2FF	629	SETB ON_FIRE ;DEZACTIVEZ DE
SIGURANTA ON_FIRE			
03B4	22	630	RET
		631	
03B5	C0D0	632	EXT_INT: PUSH PSW
03B7	C0E0	633	PUSH ACC
03B9	E8	634	MOV A,R0
03BA	C0E0	635	PUSH ACC
03BC	200719	636	JB FLAGS.7,EXT_IMP ;DACA BITUL 7
ESTE 1 SAR LA INCALZIRE			
03BF	200108	637	JB FLAGS.1,E_SC_SK ;DACA FLAGS.1=1
IGNOR TASTATURA			
03C2	51F0	638	CALL SCAN ;SCANEZ TASTATURA
03C4	754810	639	MOV KEY_INH,#KEY_IGN ;PREGATESC
DURATA DE IGNORARE			
03C7	0203FA	640	LJMP EXT_OUT
03CA	E4	641	E_SC_SK: CLR A
03CB	B54805	642	CJNE A,KEY_INH,EI_NOO ;VERIFIC DACA
MAI IGNOR			
03CE	C201	643	CLR FLAGS.1 ;NU MAI IGNOR
03D0	0203FA	644	LJMP EXT_OUT
03D3	1548	645	EI_NOO: DEC KEY_INH ;DECREMENTEZ
CONTORUL DE IGNORAARE			
03D5	0203FA	646	LJMP EXT_OUT
03D8	E545	647	EXT_IMP: MOV A,INT ;CALCULEZ MOMENTUL
DE APRINDERE			
03DA	23	648	RL A ;AL TIRISTOARELOR
03DB	C083	649	PUSH DPH
03DD	C082	650	PUSH DPL
03DF	C0E0	651	PUSH ACC
03E1	93	652	MOVC A,@A+DPTR
03E2	F58D	653	MOV TH1,A
03E4	D0E0	654	POP ACC
03E6	04	655	INC A
03E7	93	656	MOVC A,@A+DPTR
03E8	F58B	657	MOV TL1,A
03EA	D082	658	POP DPL
03EC	D083	659	POP DPH
03EE	D28E	660	SETB TR1 ;PORNESC TIMER 1
03F0	308FFD	661	JNB TF1,\$

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
03F3	53883F	662	ANL TCON,#00111111B ;OPRESC TIMERUL 1
03F6	71A6	663	CALL FIRE ;APRIND TIRISTORUL
RESPECTIV			
03F8	8004	664	SJMP EI_FIRED
03FA	78C8	665	EXT_OUT: MOV R0,#200D ;ASTEPT CITEVA SUTE
DE uS			
03FC	D8FE	666	DJNZ R0,\$
03FE	C28B	667	EI_FIRED: CLR IE1 ;STEREG CERERILE
ERONATE DE TRATARE A IE1			
0400	D0E0	668	POP ACC
0402	F8	669	MOV R0,A
0403	D0E0	670	POP ACC ;RESTAURZ REGISTRII
0405	D0D0	671	POP PSW
0407	32	672	RETI
		673	
0408		674	TAB: ;TABELA CURENT
2134		675	X SET 8500
		676	REPT 100
		677	IF X LT 1500
		678	EXITM
		679	ELSE
		680	DW 65535-X+150
		681	ENDIF
		682	X SET X-70
		683	ENDM
		684+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0408	DF61	687+1	DW 65535-X+150
		688+1	ENDIF
20EE		689+1	X SET X-70
		690+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
040A	DFA7	693+1	DW 65535-X+150
		694+1	ENDIF
20A8		695+1	X SET X-70
		696+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
040C	DFED	699+1	DW 65535-X+150
		700+1	ENDIF
2062		701+1	X SET X-70
		702+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
040E	E033	705+1	DW 65535-X+150
		706+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
201C		707+1	X SET X-70
		708+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0410	E079	711+1	DW 65535-X+150
		712+1	ENDIF
	1FD6	713+1	X SET X-70
		714+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0412	E0BF	717+1	DW 65535-X+150
		718+1	ENDIF
	1F90	719+1	X SET X-70
		720+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0414	E105	723+1	DW 65535-X+150
		724+1	ENDIF
	1F4A	725+1	X SET X-70
		726+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0416	E14B	729+1	DW 65535-X+150
		730+1	ENDIF
	1F04	731+1	X SET X-70
		732+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0418	E191	735+1	DW 65535-X+150
		736+1	ENDIF
	1EBE	737+1	X SET X-70
		738+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
041A	E1D7	741+1	DW 65535-X+150
		742+1	ENDIF
	1E78	743+1	X SET X-70
		744+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
041C	E21D	747+1	DW 65535-X+150
		748+1	ENDIF
	1E32	749+1	X SET X-70
		750+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
041E	E263	753+1	DW 65535-X+150
		754+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
1DEC		755+1	X SET X-70
		756+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0420	E2A9	759+1	DW 65535-X+150
		760+1	ENDIF
1DA6		761+1	X SET X-70
		762+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0422	E2EF	765+1	DW 65535-X+150
		766+1	ENDIF
1D60		767+1	X SET X-70
		768+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0424	E335	771+1	DW 65535-X+150
		772+1	ENDIF
1D1A		773+1	X SET X-70
		774+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0426	E37B	777+1	DW 65535-X+150
		778+1	ENDIF
1CD4		779+1	X SET X-70
		780+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0428	E3C1	783+1	DW 65535-X+150
		784+1	ENDIF
1C8E		785+1	X SET X-70
		786+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
042A	E407	789+1	DW 65535-X+150
		790+1	ENDIF
1C48		791+1	X SET X-70
		792+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
042C	E44D	795+1	DW 65535-X+150
		796+1	ENDIF
1C02		797+1	X SET X-70
		798+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
042E	E493	801+1	DW 65535-X+150
		802+1	ENDIF

LOC OBJ	LINE	SOURCE
1BBC	803+1	X SET X-70
	804+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
0430 E4D9	+1	ELSE
	807+1	DW 65535-X+150
	808+1	ENDIF
1B76	809+1	X SET X-70
	810+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
0432 E51F	+1	ELSE
	813+1	DW 65535-X+150
	814+1	ENDIF
1B30	815+1	X SET X-70
	816+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
0434 E565	+1	ELSE
	819+1	DW 65535-X+150
	820+1	ENDIF
1AEA	821+1	X SET X-70
	822+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
0436 E5AB	+1	ELSE
	825+1	DW 65535-X+150
	826+1	ENDIF
1AA4	827+1	X SET X-70
	828+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
0438 E5F1	+1	ELSE
	831+1	DW 65535-X+150
	832+1	ENDIF
1A5E	833+1	X SET X-70
	834+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
043A E637	+1	ELSE
	837+1	DW 65535-X+150
	838+1	ENDIF
1A18	839+1	X SET X-70
	840+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
043C E67D	+1	ELSE
	843+1	DW 65535-X+150
	844+1	ENDIF
19D2	845+1	X SET X-70
	846+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
043E E6C3	+1	ELSE
	849+1	DW 65535-X+150
	850+1	ENDIF



LOC	OBJ	LINE	SOURCE
198C		851+1	X SET X-70
		852+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0440	E709	855+1	DW 65535-X+150
		856+1	ENDIF
1946		857+1	X SET X-70
		858+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0442	E74F	861+1	DW 65535-X+150
		862+1	ENDIF
1900		863+1	X SET X-70
		864+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0444	E795	867+1	DW 65535-X+150
		868+1	ENDIF
18BA		869+1	X SET X-70
		870+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0446	E7DB	873+1	DW 65535-X+150
		874+1	ENDIF
1874		875+1	X SET X-70
		876+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0448	E821	879+1	DW 65535-X+150
		880+1	ENDIF
182E		881+1	X SET X-70
		882+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
044A	E867	885+1	DW 65535-X+150
		886+1	ENDIF
17E8		887+1	X SET X-70
		888+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
044C	E8AD	891+1	DW 65535-X+150
		892+1	ENDIF
17A2		893+1	X SET X-70
		894+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
044E	E8F3	897+1	DW 65535-X+150
		898+1	ENDIF

LOC OBJ	LINE	SOURCE
175C	899+1	X SET X-70
	900+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
0450 E939	903+1	DW 65535-X+150
	904+1	ENDIF
1716	905+1	X SET X-70
	906+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
0452 E97F	909+1	DW 65535-X+150
	910+1	ENDIF
16D0	911+1	X SET X-70
	912+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
0454 E9C5	915+1	DW 65535-X+150
	916+1	ENDIF
168A	917+1	X SET X-70
	918+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
0456 EA0B	921+1	DW 65535-X+150
	922+1	ENDIF
1644	923+1	X SET X-70
	924+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
0458 EA51	927+1	DW 65535-X+150
	928+1	ENDIF
15FE	929+1	X SET X-70
	930+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
045A EA97	933+1	DW 65535-X+150
	934+1	ENDIF
15B8	935+1	X SET X-70
	936+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
045C EADD	939+1	DW 65535-X+150
	940+1	ENDIF
1572	941+1	X SET X-70
	942+1	IF X LT 1500
	+1	EXITM
	+1	ELSE
045E EB23	945+1	DW 65535-X+150
	946+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
152C		947+1	X SET X-70
		948+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0460	EB69	951+1	DW 65535-X+150
		952+1	ENDIF
14E6		953+1	X SET X-70
		954+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0462	EBAF	957+1	DW 65535-X+150
		958+1	ENDIF
14A0		959+1	X SET X-70
		960+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0464	EBF5	963+1	DW 65535-X+150
		964+1	ENDIF
145A		965+1	X SET X-70
		966+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0466	EC3B	969+1	DW 65535-X+150
		970+1	ENDIF
1414		971+1	X SET X-70
		972+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0468	EC81	975+1	DW 65535-X+150
		976+1	ENDIF
13CE		977+1	X SET X-70
		978+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
046A	ECC7	981+1	DW 65535-X+150
		982+1	ENDIF
1388		983+1	X SET X-70
		984+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
046C	ED0D	987+1	DW 65535-X+150
		988+1	ENDIF
1342		989+1	X SET X-70
		990+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
046E	ED53	993+1	DW 65535-X+150
		994+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
12FC		995+1	X SET X-70
		996+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0470	ED99	999+1	DW 65535-X+150
		1000+1	ENDIF
12B6		1001+1	X SET X-70
		1002+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0472	EDDF	1005+1	DW 65535-X+150
		1006+1	ENDIF
1270		1007+1	X SET X-70
		1008+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0474	EE25	1011+1	DW 65535-X+150
		1012+1	ENDIF
122A		1013+1	X SET X-70
		1014+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0476	EE6B	1017+1	DW 65535-X+150
		1018+1	ENDIF
11E4		1019+1	X SET X-70
		1020+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0478	EEB1	1023+1	DW 65535-X+150
		1024+1	ENDIF
119E		1025+1	X SET X-70
		1026+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
047A	EEF7	1029+1	DW 65535-X+150
		1030+1	ENDIF
1158		1031+1	X SET X-70
		1032+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
047C	EF3D	1035+1	DW 65535-X+150
		1036+1	ENDIF
1112		1037+1	X SET X-70
		1038+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
047E	EF83	1041+1	DW 65535-X+150
		1042+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
10CC		1043+1	X SET X-70
		1044+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0480	EFC9	1047+1	DW 65535-X+150
		1048+1	ENDIF
1086		1049+1	X SET X-70
		1050+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0482	F00F	1053+1	DW 65535-X+150
		1054+1	ENDIF
1040		1055+1	X SET X-70
		1056+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0484	F055	1059+1	DW 65535-X+150
		1060+1	ENDIF
OFFA		1061+1	X SET X-70
		1062+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0486	F09B	1065+1	DW 65535-X+150
		1066+1	ENDIF
0FB4		1067+1	X SET X-70
		1068+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0488	F0E1	1071+1	DW 65535-X+150
		1072+1	ENDIF
0F6E		1073+1	X SET X-70
		1074+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
048A	F127	1077+1	DW 65535-X+150
		1078+1	ENDIF
0F28		1079+1	X SET X-70
		1080+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
048C	F16D	1083+1	DW 65535-X+150
		1084+1	ENDIF
0EE2		1085+1	X SET X-70
		1086+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
048E	F1B3	1089+1	DW 65535-X+150
		1090+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0E9C		1091+1	X SET X-70
		1092+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0490	F1F9	1095+1	DW 65535-X+150
		1096+1	ENDIF
0E56		1097+1	X SET X-70
		1098+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0492	F23F	1101+1	DW 65535-X+150
		1102+1	ENDIF
0E10		1103+1	X SET X-70
		1104+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0494	F285	1107+1	DW 65535-X+150
		1108+1	ENDIF
0DCA		1109+1	X SET X-70
		1110+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0496	F2CB	1113+1	DW 65535-X+150
		1114+1	ENDIF
0D84		1115+1	X SET X-70
		1116+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
0498	F311	1119+1	DW 65535-X+150
		1120+1	ENDIF
0D3E		1121+1	X SET X-70
		1122+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
049A	F357	1125+1	DW 65535-X+150
		1126+1	ENDIF
0CF8		1127+1	X SET X-70
		1128+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
049C	F39D	1131+1	DW 65535-X+150
		1132+1	ENDIF
0CB2		1133+1	X SET X-70
		1134+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
049E	F3E3	1137+1	DW 65535-X+150
		1138+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0C6C		1139+1	X SET X-70
		1140+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04A0	F429	1143+1	DW 65535-X+150
		1144+1	ENDIF
0C26		1145+1	X SET X-70
		1146+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04A2	F46F	1149+1	DW 65535-X+150
		1150+1	ENDIF
0BE0		1151+1	X SET X-70
		1152+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04A4	F4B5	1155+1	DW 65535-X+150
		1156+1	ENDIF
0B9A		1157+1	X SET X-70
		1158+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04A6	F4FB	1161+1	DW 65535-X+150
		1162+1	ENDIF
0B54		1163+1	X SET X-70
		1164+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04A8	F541	1167+1	DW 65535-X+150
		1168+1	ENDIF
0B0E		1169+1	X SET X-70
		1170+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04AA	F587	1173+1	DW 65535-X+150
		1174+1	ENDIF
0AC8		1175+1	X SET X-70
		1176+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04AC	F5CD	1179+1	DW 65535-X+150
		1180+1	ENDIF
0A82		1181+1	X SET X-70
		1182+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04AE	F613	1185+1	DW 65535-X+150
		1186+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
0A3C		1187+1	X SET X-70
		1188+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04B0	F659	1191+1	DW 65535-X+150
		1192+1	ENDIF
09F6		1193+1	X SET X-70
		1194+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04B2	F69F	1197+1	DW 65535-X+150
		1198+1	ENDIF
09B0		1199+1	X SET X-70
		1200+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04B4	F6E5	1203+1	DW 65535-X+150
		1204+1	ENDIF
096A		1205+1	X SET X-70
		1206+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04B6	F72B	1209+1	DW 65535-X+150
		1210+1	ENDIF
0924		1211+1	X SET X-70
		1212+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04B8	F771	1215+1	DW 65535-X+150
		1216+1	ENDIF
08DE		1217+1	X SET X-70
		1218+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04BA	F7B7	1221+1	DW 65535-X+150
		1222+1	ENDIF
0898		1223+1	X SET X-70
		1224+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04BC	F7FD	1227+1	DW 65535-X+150
		1228+1	ENDIF
0852		1229+1	X SET X-70
		1230+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04BE	F843	1233+1	DW 65535-X+150
		1234+1	ENDIF

14-00000
 01MIS
 01/73

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
080C		1235+1	X SET X-70
		1236+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04C0	F889	1239+1	DW 65535-X+150
		1240+1	ENDIF
07C6		1241+1	X SET X-70
		1242+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04C2	F8CF	1245+1	DW 65535-X+150
		1246+1	ENDIF
0780		1247+1	X SET X-70
		1248+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04C4	F915	1251+1	DW 65535-X+150
		1252+1	ENDIF
073A		1253+1	X SET X-70
		1254+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04C6	F95B	1257+1	DW 65535-X+150
		1258+1	ENDIF
06F4		1259+1	X SET X-70
		1260+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04C8	F9A1	1263+1	DW 65535-X+150
		1264+1	ENDIF
06AE		1265+1	X SET X-70
		1266+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04CA	F9E7	1269+1	DW 65535-X+150
		1270+1	ENDIF
0668		1271+1	X SET X-70
		1272+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04CC	FA2D	1275+1	DW 65535-X+150
		1276+1	ENDIF
0622		1277+1	X SET X-70
		1278+1	IF X LT 1500
		+1	EXITM
		+1	ELSE
04CE	FA73	1281+1	DW 65535-X+150
		1282+1	ENDIF

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
05DC		1283+1	X SET X-70
		1284	
		1285	END

XREF SYMBOL TABLE LISTING

NAME TYPE VALUE ATTRIBUTES / REFERENCES

AC	B ADDR	00D0H.6	A	52#
ACC	D ADDR	00E0H	A	
13# 207 383 385 399 401 413 415 424 426 449 454 457 461 463 465				
475 477 479 497 505 509 513 519 531 633 635 651 654 668 670				
ADCON	D ADDR	00D8H	A	45# 374 377
ADDAT	D ADDR	00D9H	A	46# 380
ADM	B ADDR	00D8H.3	A	117#
AFIS	C ADDR	01DCH	A	273 283 299 306 314 333 383#
A_LOOP	C ADDR	01E3H	A	387# 398
A_OUT	C ADDR	01F9H	A	390 399#
B	D ADDR	00F0H	A	14# 202 344 345 349 359 438 439 443 446 499
501 502				
BD	B ADDR	00D8H.7	A	114#
BEGIN	C ADDR	0057H	A	189 198#
BSY	B ADDR	00D8H.4	A	116# 379
CCEN	D ADDR	00C1H	A	33#
CCH1	D ADDR	00C3H	A	35#
CCH2	D ADDR	00C5H	A	37#
CCH3	D ADDR	00C7H	A	39#
CCL1	D ADDR	00C2H	A	34#
CCL2	D ADDR	00C4H	A	36#
CCL3	D ADDR	00C6H	A	38#
CH_LT	C ADDR	01A6H	A	352 354#
CLK	B ADDR	00D8H.6	A	115#
CLS	N NUMB	0001H	A	149# 270 280 296 303 311 330
COM_DIS	C ADDR	01FFH	A	254 256 258 260 262 264 271 281 297 304 312
331 404# 511 512				
CRCH	D ADDR	00CBH	A	42#
CRCL	D ADDR	00CAH	A	41#
CY	B ADDR	00D0H.7	A	51#
C_LEFT	N NUMB	0010H	A	150# 510
C_OFF	N NUMB	000CH	A	151# 263
C_ON	N NUMB	000EH	A	152#
DAPR	D ADDR	00DAH	A	47# 378
DELAY	C ADDR	020EH	A	301 309 343 346 413#
DN	N NUMB	000DH	A	143# 490 614

LOC OBJ	LINE	SOURCE
DPH	D ADDR 0083H A	17# 392 395 404 410 429 435 450 456 538 618
649 659		
DPL	D ADDR 0082H A	16# 391 396 405 409 430 434 451 455 537 619
650 658		
D_LOOP . . .	C ADDR 0192H A	345# 354 360
D_LP	C ADDR 0215H A	417# 423
D_PRES . . .	D ADDR 0041H A	178# 284 288 360
EADC	B ADDR 00B8H.0 A	85#
EAL	B ADDR 00A8H.7 A	69# 266
EI_FIRED . .	C ADDR 03FEH A	664 667#
EI_NO0 . . .	C ADDR 03D3H A	642 645#
ES	B ADDR 00A8H.4 A	72#
ESC	N NUMB 000EH A	144# 469 546
ET0	B ADDR 00A8H.1 A	75#
ET1	B ADDR 00A8H.3 A	73#
ET2	B ADDR 00A8H.5 A	71#
EX0	B ADDR 00A8H.0 A	76#
EX1	B ADDR 00A8H.2 A	74# 220
EX2	B ADDR 00B8H.1 A	84#
EX3	B ADDR 00B8H.2 A	83#
EX4	B ADDR 00B8H.3 A	82#
EX5	B ADDR 00B8H.4 A	81#
EX6	B ADDR 00B8H.5 A	80#
EXEN2	B ADDR 00B8H.7 A	78#
EXF2	B ADDR 00C0H.7 A	122#
EXT_IMP . . .	C ADDR 03D8H A	636 647#
EXT_INT . . .	C ADDR 03B5H A	632#
EXT_OUT . . .	C ADDR 03FAH A	640 644 646 665#
E_SC_SK . . .	C ADDR 03CAH A	637 641#
F0	B ADDR 00D0H.5 A	53#
F1	B ADDR 00D0H.1 A	57#
FIRE	C ADDR 03A6H A	622# 663
FLAGS	N NUMB 0020H A	174# 342 361 520 521 522 525 526 533 556 575
576 595 596 615 616 636 637 643		
F_LOOP	C ADDR 03AAH A	625# 628
I2FR	B ADDR 00C8H.5 A	107#
I3FR	B ADDR 00C8H.6 A	106#
IADC	B ADDR 00C0H.0 A	129#
IE0	B ADDR 0088H.1 A	66#
IE1	B ADDR 0088H.3 A	64# 221 667
IEN0	D ADDR 00A8H A	28#
IEN1	D ADDR 00B8H A	29#
IEX2	B ADDR 00C0H.1 A	128#
IEX3	B ADDR 00C0H.2 A	127#
IEX4	B ADDR 00C0H.3 A	126#
IEX5	B ADDR 00C0H.4 A	125#
IEX6	B ADDR 00C0H.5 A	124#
INT	D ADDR 0045H A	182# 341 355 358 647

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
INT0	...	B ADDR 00B0H.2	A 92#
INT1	...	B ADDR 00B0H.3	A 91#
IP0	...	D ADDR 00A9H	A 30#
IP1	...	D ADDR 00B9H	A 31#
IRCON	...	D ADDR 00C0H	A 32#
IT0	...	B ADDR 0088H.0	A 67#
IT1	...	B ADDR 0088H.2	A 65# 218
KEY	...	D ADDR 0046H	A 183# 468 523 527 534 557 577 597 617
KEY_HOLD	..	N NUMB 0003H	A 146# 524
KEY_IGN	..	N NUMB 0010H	A 147# 639
KEY_INH	..	D ADDR 0048H	A 185# 639 642 645
MES1	...	C ADDR 0003H	A 191# 298
MES2	...	C ADDR 0013H	A 192# 305
MES3	...	C ADDR 0023H	A 193# 313
MES4	...	C ADDR 0033H	A 194# 332
MES5	...	C ADDR 0043H	A 195# 272
MES6	...	C ADDR 004EH	A 196# 282
MX0	...	B ADDR 00D8H.0	A 120#
MX1	...	B ADDR 00D8H.1	A 119#
MX2	...	B ADDR 00D8H.2	A 118#
M_CL	...	C ADDR 0074H	A 212# 216
M_CLR	...	C ADDR 0079H	A 212 214#
M_LOOP	..	C ADDR 00E3H	A 269# 371
M_SKR7	..	C ADDR 007AH	A 213 215#
NR_IMP	...	N NUMB 0008H	A 153# 623
NR_STR	...	D ADDR 0043H	A 180# 274 278 367
OK	...	N NUMB 000BH	A 141# 473 605 608
ON_FIRE	..	B ADDR 00F8H.7	A 172# 624 627 629
OV	...	B ADDR 00D0H.2	A 56#
P	...	B ADDR 00D0H.0	A 58#
P0	...	D ADDR 0080H	A 6#
P1	...	D ADDR 0090H	A 7# 338 339 340 362 364
P1_GT	...	C ADDR 0168H	A 325 327#
P1_LOOP	..	C ADDR 015FH	A 323# 327
P2	...	D ADDR 00A0H	A 8#
P3	...	D ADDR 00B0H	A 9#
P4	...	D ADDR 00E8H	A 10#
P5	...	D ADDR 00F8H	A 11# 172 300 307 308 320 321 322 336 337 363
368 369 370			
PCON	...	D ADDR 0087H	A 18#
PR	...	N NUMB 000FH	A 145# 482 611
PR_I	...	N NUMB 0080H	A 155# 325
PR_P	...	N NUMB 0030H	A 154# 317
PSW	...	D ADDR 00D0H	A 12# 208 632 671
P_GT	...	C ADDR 0157H	A 317 319#
P_KEY	...	D ADDR 0047H	A 184# 523 528
P_LOOP	..	C ADDR 014EH	A 315# 319
R0_TAS	...	N NUMB 80FEH	A 137# 539

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
R1_TAS...	N NUMB	80FDH A	138# 558
R2_TAS...	N NUMB	80FBH A	139# 578
R3_TAS...	N NUMB	80F7H A	140# 598
RB8....	B ADDR	0098H.2 A	101#
RD....	B ADDR	00B0H.7 A	87#
READ_ADC..	C ADDR	01CCH A	316 324 348 373#
READ_VAL..	C ADDR	0261H A	277 287 460#
REN....	B ADDR	0098H.4 A	99#
RI....	B ADDR	0098H.0 A	103#
RS0....	B ADDR	00D0H.3 A	55#
RS1....	B ADDR	00D0H.4 A	54#
RV_00...	C ADDR	02A2H A	491 494#
RV_99...	C ADDR	0295H A	485 488#
RV_BACK...	C ADDR	026EH A	468# 516
RV_EXIT...	C ADDR	027CH A	472 475#
RV_FAR1...	C ADDR	0298H A	484 490#
RV_FAR2...	C ADDR	02A5H A	490 496#
RV_FAR3...	C ADDR	02B9H A	487 489 493 495 508#
RV_NO_ESC.	C ADDR	0278H A	469 473#
RV_NO_OK..	C ADDR	0286H A	473 482#
RV_PROG...	C ADDR	02C6H A	483 515#
RV_SK_PROG	C ADDR	028BH A	482 484#
RXD....	B ADDR	00B0H.0 A	94#
R_COM...	N NUMB	C002H A	134# 452
R_DATA...	N NUMB	C003H A	135#
SBUF....	D ADDR	0099H A	26#
SCAN....	C ADDR	02F0H A	537# 638
SCON....	D ADDR	0098H A	25#
SM0....	B ADDR	0098H.7 A	96#
SM1....	B ADDR	0098H.6 A	97#
SM2....	B ADDR	0098H.5 A	98#
SP....	D ADDR	0081H A	15# 198
STRAT...	D ADDR	0042H A	179# 328 334 365 366
SWDT...	B ADDR	00B8H.6 A	79#
S_0....	C ADDR	032FH A	564 567#
S_4....	C ADDR	0314H A	551 554#
S_5....	C ADDR	033DH A	570 573#
S_6....	C ADDR	0369H A	590 593#
S_7....	C ADDR	030DH A	548 551#
S_8....	C ADDR	0336H A	567 570#
S_9....	C ADDR	0362H A	587 590#
S_DN....	C ADDR	038EH A	607 610#
S_ESC...	C ADDR	0306H A	545 548#
S_FAR...	C ADDR	031DH A	544 554 558#
S_FAR1...	C ADDR	0349H A	563 573 575 578#
S_FAR2...	C ADDR	0375H A	583 593 595 598#
S_FAR3...	C ADDR	03A1H A	603 613 615 618#
S_LOOP...	C ADDR	016DH A	329# 367

LOC	OBJ	LINE	SOURCE
S_OK...	C ADDR	035BH A	584 587#
S_OK1...	C ADDR	0387H A	604 607#
S_OUT0...	C ADDR	0319H A	547 550 553 556#
S_OUT1...	C ADDR	0342H A	566 569 572 575#
S_OUT2...	C ADDR	036EH A	586 589 592 595#
S_OUT3...	C ADDR	039AH A	606 609 612 615#
S_UP...	C ADDR	0395H A	610 613#
T0...	B ADDR	00B0H.4 A	90#
T1...	B ADDR	00B0H.5 A	89#
T2CM...	B ADDR	00C8H.2 A	110#
T2CON...	D ADDR	00C8H A	40#
T2I0...	B ADDR	00C8H.0 A	112#
T2I1...	B ADDR	00C8H.1 A	111#
T2PS...	B ADDR	00C8H.7 A	105#
T2R0...	B ADDR	00C8H.3 A	109#
T2R1...	B ADDR	00C8H.4 A	108#
TAB...	C ADDR	0408H A	674#
TAST...	C ADDR	02CBH A	515 518#
TB8...	B ADDR	0098H.3 A	100#
TCON...	D ADDR	0088H A	19# 200 230 237 244 251 294 422 662
TEMP...	D ADDR	0040H A	177# 268 275 278 285 288 466 467 470
TF0...	B ADDR	0088H.5 A	62# 229 236 243 250 293 421
TF1...	B ADDR	0088H.7 A	60# 661
TF2...	B ADDR	00C0H.6 A	123#
TH0...	D ADDR	008CH A	23# 203 227 234 241 248 291 419
TH1...	D ADDR	008DH A	24# 205 653
TH2...	D ADDR	00CDH A	44#
TI...	B ADDR	0098H.1 A	102#
TL0...	D ADDR	008AH A	21# 204 226 233 240 247 290 418
TL1...	D ADDR	008BH A	22# 206 657
TL2...	D ADDR	00CCH A	43#
TMOD...	D ADDR	0089H A	20# 201 219
TR0...	B ADDR	0088H.4 A	63# 228 235 242 249 292 420
TR1...	B ADDR	0088H.6 A	61# 660
TXD...	B ADDR	00B0H.1 A	93#
T_LOOP...	C ADDR	02DAH A	525# 529
T_NOGOOD	C ADDR	02D0H A	521# 528
UP...	N NUMB	000CH A	142# 484 585
VAL...	D ADDR	0044H A	181# 345 351
WAIT...	C ADDR	024DH A	387 408 433 449#
WDT...	B ADDR	00A8H.6 A	70#
WLOOP...	C ADDR	0256H A	453# 454
WR...	B ADDR	00B0H.6 A	88#
WR_CH...	C ADDR	022BH A	276 286 429# 442 445
WR_HEX...	C ADDR	023AH A	335 438# 514
W_COM...	N NUMB	C000H A	132# 223 406
W_DATA...	N NUMB	C001H A	133# 393 431
X...	N NUMB	05DCH A	

675# 684 687 689# 689 690 693 695# 695 696 699 701# 701 702 705 707# 707 708
711 713# 713 714 717 719# 719 720 723 725# 725 726 729 731# 731 732 735 737#
737 738 741 743# 743 744 747 749# 749 750 753 755# 755 756 759 761# 761 762
765 767# 767 768 771 773# 773 774 777 779# 779 780 783 785# 785 786 789 791#
791 792 795 797# 797 798 801 803# 803 804 807 809# 809 810 813 815# 815 816
819 821# 821 822 825 827# 827 828 831 833# 833 834 837 839# 839 840 843 845#
845 846 849 851# 851 852 855 857# 857 858 861 863# 863 864 867 869# 869 870
873 875# 875 876 879 881# 881 882 885 887# 887 888 891 893# 893 894 897 899#
899 900 903 905# 905 906 909 911# 911 912 915 917# 917 918 921 923# 923 924
927 929# 929 930 933 935# 935 936 939 941# 941 942 945 947# 947 948 951 953#
953 954 957 959# 959 960 963 965# 965 966 969 971# 971 972 975 977# 977 978
981 983# 983 984 987 989# 989 990 993 995# 995 996 999 1001# 1001 1002 1005
1007# 1007 1008 1011 1013# 1013 1014 1017 1019# 1019 1020 1023 1025# 1025 1026
1029 1031# 1031 1032 1035 1037# 1037 1038 1041 1043# 1043 1044 1047 1049# 1049
1050 1053 1055# 1055 1056 1059 1061# 1061 1062 1065 1067# 1067 1068 1071 1073#
1073 1074 1077 1079# 1079 1080 1083 1085# 1085 1086 1089 1091# 1091 1092 1095
1097# 1097 1098 1101 1103# 1103 1104 1107 1109# 1109 1110 1113 1115# 1115 1116
1119 1121# 1121 1122 1125 1127# 1127 1128 1131 1133# 1133 1134 1137 1139# 1139
1140 1143 1145# 1145 1146 1149 1151# 1151 1152 1155 1157# 1157 1158 1161 1163#
1163 1164 1167 1169# 1169 1170 1173 1175# 1175 1176 1179 1181# 1181 1182 1185
1187# 1187 1188 1191 1193# 1193 1194 1197 1199# 1199 1200 1203 1205# 1205 1206
1209 1211# 1211 1212 1215 1217# 1217 1218 1221 1223# 1223 1224 1227 1229# 1229
1230 1233 1235# 1235 1236 1239 1241# 1241 1242 1245 1247# 1247 1248 1251 1253#
1253 1254 1257 1259# 1259 1260 1263 1265# 1265 1266 1269 1271# 1271 1272 1275
1277# 1277 1278 1281 1283# 1283

REGISTER BANK(S) USED: 0

ASSEMBLY COMPLETE, NO ERRORS FOUND

ANEXA 6

LISTA SIMBOLURILOR ȘI A PRESCURTĂRILOR UTILITARE

Ca în orice domeniu tehnic și în microelectronică, viteza cu care se dezvoltă și pătrund noștinuni noi este în general mai ridicată, decât viteza cu care limba română le poate traduce și literatura română de specialitate le poate asimila.

Având în vedere această realitate fizică a zilelor noastre și dorința declarată de elaborare a unei lucrări unitare, autorul s-a confruntat cu alegerea uneia din cele două alternative posibile:

- crearea de simboluri și prescurtări noi negeneralizate dar adaptate la specificul limbii române
- utilizarea simbolurilor și prescurtărilor deja cunoscute în literatura străină de specialitate.

Pentru a evita ambiguitățile generate prin traducerea “cuvânt cu cuvânt” a unor termeni de strictă specialitate asigurând totodată și o lectură facilă a lucrării, am adoptat o variantă intermediară care utilizează simbolurile din literatura străină de specialitate, concomitent cu traducerea în limba română a noțiunilor respective.

a) LISTA SIMBOLURILOR UTILIZATE

A - area of a film (suprafața statului)

d - film thickness (grosimea stratului)

d^* - apparent film thickness (grosimea aparentă a stratului)

d_0 - initial film thickness (grosimea stratului inițial)

d_i - i layer thickness in a multilayer film (grosimea stratului i în structuri multistratificate)

d_t - total film thickness in a multilayer film (grosimea totală a straturilor în structuri multistratificate)

f - frequency (frecvență)

I - intensity of transmitted radiation (intensitatea radiației transmise)

I_m - minimum intensity of transmitted radiation (intensitatea minimă a radiației transmise)

I_M - maximum intensity of transmitted radiation (intensitatea maximă a radiației transmise)

I_0 - intensity of incident radiation (intensitatea radiației incidente)

K - constant (constantă de proporționalitate)

K_i - absorption coefficient of medium (coeficientul de absorbție al mediului)

k_i - extinction coefficient in medium i (coeficientul de extincție în mediul i)

l, h, x - measured distance (distanțe măsurate în condiții specificate)

l_q - thickness of quartz crystal (grosimea cristalului de cuarț)
 L - measured distance on a bevel (distanțe interfranje)
 m - weight of quartz crystal (masa cristalului de cuarț)
 N - interference order (ordinul de interferență)
 N_q - frequency constant for AT - cut quartz crystal (constanta de frecvență a cristalului de cuarț cu tăietură AT)
 N_i - particular interference order (ordinul i de interferență)
 n - refractive index (indice de refracție)
 n_i - refractive index of medium i (indicele de refracție al mediului i)
 n_{2i} - refractive index of medium 2 at wavelength λ_i (indicele de refracție al mediului 2 la radiații cu lungimea de undă λ_i)
 P - polarizer reading on an ellipsometer (polarizarea indicată de elipsometru)
 R - ratio of reflected to incident energy of radiation (raportul dintre energia reflectată și incidentă a radiației)
 R_p - amplitude of total reflection of the parallel component of radiation (amplitudinea reflexiei totale a componentei paralele a radiației)
 R_0 - amplitude of total reflection of the perpendicular component of radiation (amplitudinea reflexiei totale a componentei perpendiculare a radiației)
 r_{12} - Fresnel-reflection coefficient of the perpendicular component at the 1-2 interface (coeficientul de reflexie al lui Fresnel pentru componenta perpendiculară a radiației la interfața dintre mediile 1-2)
 r_{12p} - Fresnel-reflection coefficient of the parallel component at the 1-2 interface (coeficientul de reflexie al lui Fresnel pentru componenta paralelă a radiației la interfața dintre mediile 1-2)
 r_d - rate of thickness (rata grosimii)
 T - ratio of transmitted to incident energy of radiation (raportul dintre energia transmisă și incidentă a radiației)
 t_0 - period of oscillation for the original crystal (perioada de oscilație a cristalului neîncărcat)
 t - period of the oscillation for the loaded crystal (perioada de oscilație a cristalului încărcat)
 w - weight of a film (greutatea stratului depus)
 z - acoustic impedance (impedanța acustică)
 ρ - density of a film (densitatea stratului)
 ρ_q - density of quartz (densitatea cuarțului)
 ρ_i - density of film i (densitatea stratului i)
 Δ - difference (diferența)
 $\Delta\varphi$ - phase difference (diferența de fază)
 Δf - frequency difference (diferența de frecvență)
 Δt - period difference (diferența de perioadă)
 ε_d - error in measuring film thickness (eroarea produsă la măsurarea grosimii stratului)

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ - axial error in measuring film thickness (eroarea axială a grosimii stratului)

ε_λ - error in measuring λ_i (eroarea produsă la măsurarea lungimii de undă λ_i)

μ_f, μ_q - the shear moduli of deposited film and quartz crystal (modulul de elasticitate al stratului depus respectiv al cristalului de cuarț)

b) LISTA PRESCURTĂRILOR UTILIZATE

Å - amstrong (10^{-10} m)

ADSS - agregat depunere straturi subțiri

APD - automatizarea procesului de depunere

ATE - echipament de testare automată (*Automatic test equipment*)

BA - bloc alimentare

BCA - bloc control afișaj

BCD - bloc control date

BMDf - bloc măsurare diferență de frecvență

BMI - bloc măsurare de frecvență

BT - bază de timp

CAN - convertor analog numeric

CBB - circuit basculant bistabil

CBM - circuit basculant monostabil

CI - circuit integrat

CNA - convertor numeric analogic

CPU - unitate centrală de prelucrare (*central processing unit*)

CRD - controlul ratei depunerii

DC - detector de condiție

DUT - dispozitiv supus testării (*device under test*)

GA - generator de adrese

ICC - interfață calculator central

I/O - interfață intrare/ieșire

Inch - unitate de măsură anglo-saxonă (1 inch=25.4mm)

IP - interfață paralelă

IS - interfață serială

MIP - memoria instrucțiunilor program

OSC - oscilator

PG - prescriere grosime

PIO - interfață programabilă de intrare/ieșire (*peripheral input/output*)

RAM - memorie cu acces aleator (*random acces memory*)

RD - denumirea semnalului de citire (activ pe zero)

WR - denumirea semnalului de înscriere a informației (activ pe unu)

SS - strat subțire

μm - micrometru (10^{-6} m)

BIBLIOGRAFIE

Bibliografia consacrată metodelor și echipamentelor de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri depuse în instalații industriale de vid înalt, este deosebit de voluminoasă. Noi am menționat în această teză de doctorat numai manualele, articolele și prospectele firmelor la care ne-am referit direct în lucrare.

1. [BA,92] Baker A. et al. - "Physical design of electronic systems", Prentice Hall Inc., New York 1992
2. [BA,95] *** "Coating materials" Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1995
3. [BA,96-1] *** "High Vacuum Coating Plant", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
4. [BA,96-2] *** "Electron Beam Evaporation Equipment", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
5. [BA,96-3] *** "High Vacuum Coating Unit BAC 550", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
6. [BA,96-4] *** "Low Implanter MPB 202", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
7. [BA,96-5] *** "Coating Materials for Electron Beam Evaporation Sources", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein, 1996
8. [BA,96-6] *** "Sputtering Equipment for the Production of Thin Films of Metals and Dielectrics", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
9. [BA,96-7] *** "Power Supply Units 7 and 15 kW and Control Units for Electron Beam Evaporation Sources", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
10. [BA,96-8] *** "High Vacuum Metallizing Plant BAH 2000", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
11. [BA,96-9] *** "Instruments de mesure du vide. Measure contrôle-régulation", Prospectele firmei BALZERS, Liechtenstein 1996
12. [BR,88] Berry R. W. et al. - "Thin Film Technology", Editura Van Nostrand Company, London 1988

13. |BT,87| Bennett H. E., Hass G. and Thun R. E. - "Physics of Thin Films", The Electrochemical Society, New York 1987
14. |CG,88| Cunningham S. A. and Gardner W. R. - "Multilevel Metallization Systems for Silicon Integrated Circuits", Solid State Technology, USA 1988
15. |CG,89| Clark G. L. (ed) - "Encyclopedia of X-rays and Gamma Rays", Reinhold Publishing Corporation, New York 1989
16. |CA,88| Camenzind H. - "Circuits Design for Integrated Electronics", Addison-Wesley, California 1988
17. |CH,83-1| Cârstea H. C. - "Aspecte privind metalizarea dispozitivelor semiconductoare utilizând pelicule subțiri de wolfram", Lucrările sesiunii de comunicări științifice de Electronică aplicată, IPTV Timișoara 1983
18. |CH,83-2| Cârstea H. C. - "Asupra preciziei de realizare a condensatoarelor cu pelicule subțiri", Buletinul științific și tehnic al IPTV Timișoara 1983
19. |CH,83-3| Cârstea H. C., Harea V.-"Asupra unor realizări în domeniul circuitelor integrate hibride la IPTV", Timișoara 1983
20. |CH,84-1| Cârstea H. C. - "Asupra erorilor metodei cuarțului rezonant, utilizat la măsurarea grosimii straturilor subțiri, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt", Lucrările Simpozionului Național de Metrologie, București 1984
21. |CH,84-2| Cârstea H. C. - "Instalație pentru măsurarea și controlul în timpul procesului tehnologic a grosimii straturilor subțiri depuse succesiv în agregate de vid înalt", Lucrările Conferinței Naționale de Electronică, București 1984
22. |CH,84-3| Cârstea H. C. - "Metodă de măsurare și control în timpul procesului tehnologic a grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv în instalații industriale de vid înalt", Lucrările Conferinței Naționale de Electronică, București 1984
23. |CH,85-1| Cârstea H. C. - "Traductor pentru măsurarea grosimii straturilor subțiri depuse în instalații industriale de vid înalt", Certificat de inovator Nr. 1789/12.12.1985, București 1985
24. |CH,87-2| Cârstea H. C., Chioreanu V. - "Model of Adjustable Pelicular Precision Resistor, for Measuring Conductivity at Cryogen Temperature", Lucrările simpozionului "Cercetări în domeniul temperaturilor criogene", Moscova 1987
25. |CH,88| Cârstea H. C. - "Influența formelor și dimensiunilor geometrice asupra parametrilor electrice ai inductoarelor peliculare", Lucrările Conferinței Naționale de Electronică, București 1988
26. |CH,89-1| Cârstea H. C. - "Aparat pentru măsurarea și controlul grosimii straturilor subțiri de natură diferită, depuse succesiv în instalații

- industriale de vid înalt”, Brevet de invenție Nr. 93890/04.11.1989, București România 1989
27. |CH,89-2| Cârstea H. C. - “Model și metodă de ajustare pentru model de rezistor pelicular ajustabil de precizie”, Certificat de inovator Nr. 635/01.07.1987, Ministerul Educației și Învățământului, București 1989
 28. |CH,89-3| Cârstea H. C., Georgescu M. - “Circuite electronice în tehnologia hibridă - Aplicații”, Editura Facla, Timișoara 1989
 29. |CH,91| Cârstea H. C. - “Tehnologie electronică. Echipamente electronice complexe - curs”, Litografia IPTV Timișoara 1991
 30. |CH,94| Cârstea H.C.-”Principii și metode de măsurare și control a grosimii straturilor subțiri obținute prin procedee industriale de depunere în vid înalt”,Referat în cadrul pregătirii pentru doctorat,UP Timișoara 1994
 31. |CH,95| Cârstea H.C.- “Echipamente automate de comandă și control a parametrilor de proces ai unei instalații industriale de obținere a straturilor subțiri prin depuneri succesive în vid înalt”,Referat în cadrul pregătirii pentru doctorat,UP Timișoara 1995
 32. |CH,97| Cârstea H.C.- “Testarea echipamentelor electronice - curs”,Litografia UP Timișoara 1997
 33. |CS,87| Crowell C. R., Sze S. M. - “Physics of Thin Film”, Academic Press, New York 1987
 34. |CT,87| Chu T. L. - “Solid State Technology”, John Wiley & Sons Inc, New York 1987
 35. |CV,82| Cătuneanu V. M. (coordonator) - “Materiale pentru electronică”, Editura Didactică și Pedagogică, București 1982
 36. |CV,84| Cătuneanu V. M. (coordonator) - “Tehnologie electronică”, Editura Didactică și Pedagogică, București 1984
 37. |DD,86| Dan P. Al., Brezeanu G., Dascălu D. - “Investigarea microfizică a metalizărilor la dispozitive semiconductoare și circuite integrate”, Lucrările Conferinței Anuale de semiconductoare, Sinaia 1986
 38. |DJ,85| Doyle J. - “Thin Film and Semiconductor Integrated circuitry”, Mc. Graw-Hill Book Co., New York 1985
 39. |DM,82| Drăgănescu M. - “Electronica Corpului Solid”, Editura Tehnică, București 1982
 40. |DM,80| Dima I., Munteanu I. - “Materiale și dispozitive semiconductoare”, Editura Didactică și Pedagogică, București 1980
 41. |FL,90| *** “Semiconductor Processing Equipment”, Prospectele firmei FLUOROWARE, Minnesota, USA 1990
 42. |FM,92| Françon M. - “Optical Interferometry”, Academic Press Inc. Co., New York 1992
 43. |FS,94| Flint P. S., Schwartz B. and Schwartz N. - “Measurement

Techniques for Thin Films”, The Electrochemical Society, New York 1994

44. |GA,83| Grove A. S. - “Fizica și tehnologia dispozitivelor semiconductoare”, Editura Tehnică, București 1983
45. |GA,87| Guzinski A. - “Mikroelektronika - Projektowanie i konstrukcja ukladow warstwtwowych”, Wydawnictwa komunikacji i łączności, Warszawa 1987
46. |GA,88| Guthrie J. W. and Ahearn A. J. - “Masa Spectrometric Analysis of Solids Thin Films”, Elsevier Publishing Company, New York 1988
47. |GC,91| *** “The 4000 Serie Tester and Inspection Station”, Prospectele firmei GCA Corporation Sunnyvale Division, IC Systems Group, USA 1991
48. |GP,89| Gyosjean P. - “The Integrated Connectios Technology for Hibrid Integrated Circuits”, Revne MBLE, Vol. XIII, Nr. 4, 1989
49. |GS,92| Gillespie D. J., Schwartz N. - “Measurement of Thickness”, The Electrochemical Society, New York 1992
50. |GS,93| Gardner E. E., Schwartz B. and Schwartz N. - “Measurement Techniques for Thin Films”, The Electrochemical Society, New York 1993
51. |GS,94| Gardener E. E., Schumann P. A. Jr., Gorey E. F., Schwartz B. and Schwartz N. - “Measurement Technique for Thin Films”, The Electrochemical Society, New York 1994
52. |GS,95| Guldner W. G., Brown R., Schwartz B. and Schwartz N. - “Measurement Techniques for Thin Films”, The Electrochemical Society, New York 1995
53. |HA,88| Hickmann W. M., Sweeney G. and Ahearn J. A. - “Masa Spectrometric Analysis of Solids”, Elsevier Publishing Company, Amsterdam 1988
54. |HL,92| Holland L. - “Thin Film Microelectronics”, John Willey & Sons Inc., New York 1992
55. |HO,94| Heavens O. S. - “Optical Properties of Thin Solid Films”, Butterworth Scientific Publications, London 1994
56. |HR,92| Hajdu I., Ripka G. - “Hybrid integrált aramkörök”, Müszaki Könyvkiadó, Budapest 1992
57. |HS,85| Hickmann W. M. and Sandler Y. L. - “Surface Effects in Detection”, Spartan Books, Washington DC 1985
58. |HT,94| Hearens O. S., Hass G. and Thun R. E. - “Physics of Thin Films”, Vol 1 & 2, Academic Press Inc., New York 1994
59. |HV,86| Hoffman V. - ‘High Rate Magnetron Sputtering for Metallizing Semiconductor Devices”, The Solid State Technology, USA 1986
60. |HZ,89| Hoffmeister W and Znegel M. A. - “Thin Solid Films”, John Willey & Sons Inc., New York 1989

61. |IN,91-1| *** "Quadex Family RGA", Prospectele firmei INFICON, New York 1991
62. |IN,91-2| *** "Thin Film Deposition controllers", Prospectele firmei INFICON, New York 1991
63. |IN,91-3| *** "Vacuum Gauges", Prospectele firmei INFICON, New York 1991
64. |IN,91-4| *** "Residual Gas Analyzers", Prospectele firmei INFICON, New York 1991
65. |IN,91-5| *** "Helium Leak Detectors", Prospectele firmei INFICON, New York 1991
66. |IN,91-6| *** "Computerized Surface Profiler", Prospectele firmei INFICON, New York 1991
67. |KA,93| Kutzelnigg A. - "Testing Metallic Coatings", Robert Draper Ltd. Teddington, England 1993
68. |KC,91| Kittel C. - "Introducere în fizica corpului solid", Editura Tehnică, București 1991
69. |KE,93| Keonjian E. et al. - "Microelectronics", Mc. Graw-Hill Book Co., New York 1993
70. |KE,94| Kagan M. T., Edmondson T. H. - "The Application of Pattern Generation Capabilities to Thin Film Hybrid Substrates and Resistor Networks", Hybrid Circuit Technology, October 1994
71. |KG,88| Keinath G. - "The Measurement of Thickness", National Bureau of Standards, Washington DC 1988
72. |KG,90| Koopman N. G. and Guiewek J. - "Electron Beam Microprobe Technique to Measure Glass Thickness and Composition", National Conference on Electron Microbeam Analysis, Chicago 1990
73. |LT,92| Lamont L. T. Jr. - "Thin Film Note-book Reprinted from VARIAN Vacuum Views", New York 1992
74. |LZ,90| Liebhafsky H. A., Pfeiffer H. G., Winslow H. E. and Zemaný P. D. - "X-ray Absorption and Emission in Analytical Chemistry", John Willey & Sons Inc., New York 1990
75. |MA,86-1| Manolescu A. - "Tehnologia straturilor subțiri - curs", Litografia Institutului Politehnic București 1986
76. |MA,86-2| Manolescu A. M. - "Aspecte privind proiectarea rezistoarelor cu straturi subțiri", Electrotehnica, Electronica și Automatică Nr. 2, București 1986
77. |MA,86-3| Manolescu A. - "Ajustarea rezistoarelor peliculare cu ajutorul fasciculului Laser", Electrotehnica, Electronica și Automatică Nr. 3, București 1986
78. |MA,88| Manolescu A. și alții - "Calculation of Thin Film Distributed Resistive Structures", Proceedings of IEEE, USA 1988

79. |MA,89| Manolescu A. și alții - "A General Approach to Analysis of Distributed Resistive Structures", IEEE Transaction on Electron Devices, USA 1989
80. |MC,84| Moțoc C. - "Fizica corpului solid", Editura Didactică și Pedagogică, București 1984
81. |MG,90| Maissel L., Glang R. - "Handbook of Thin Film Technology", Mc. Graw-Hill Book Co., New York 1990
82. |MR,90| *** "Sputtering Modules and Systems", Prospectele firmei MATERIALS RESEARCH CORPORATION, New York 1990
83. |MR,91| *** "The 822 Multi-target Turred-head RF Sequential Sputtering Systems", Prospectele firmei MATERIALS RESEARCH CORPORATION, New York 1991
84. |MS,88| Moroșanu C. and Șoltuz V. - "Kinetics and Properties of Chemically Deposited Tungsten Film on Silicon Substrates", Thin Film Technology, USA 1988
85. |MZ,86| Meiskin Z. H. - "Thin and Thick Films for Hybrid Microelectronics", Lexington Book Mass, USA 1986
86. |NS,89| Nengebaner C. A., Schwartz B. and Schwartz N. - "Measurement Techniques for Thin Films", The Electrochemical Society, New York 1989
87. |PG,89| Pliskin W. A., Murt E. M., Guldner W. G. - "Physical Measurement and Analysis of Thin Films", Plenum Publishing Corp., New York 1989
88. |PK,94| Passaghia E., Stromberg R. R. and Kruger J - "Ellipsometry in the Measurement of Surfaces and Thin Films", NBS Publishing Government Printing Office, Washington DC 1994
89. |PS,87| Pliskin W. A., Schwartz B. and Schwartz N. - "Measurement Technique for Thin Films", The Electrochemical Society, New York 1987
90. |PZ,92| Pliskin W. A., Zanin S. J. - "Film Thickness and Composition", IBM Components Divison, East Flashkill, New York 1992
91. |RM,85| Rădulescu M. - "Studiu asupra proprietăților electrice ale filmelor de siliciu policristaline", Lucrările Conferinței Anuale de Semiconductoare, Sinaia 1985
92. |RP,87| Rău S., Popovici G. - "Influența substratelor asupra structurii straturilor subțiri, determinată prin difracție cu raze X", Lucrările Conferinței Anuale de Semiconductoare, Sinaia 1987
93. |SB,91| *** "Thick and Thin Film Conveyor Furnaces", Prospectele firmei SOLA BASIC INDUSTRIES, Lindberg Division, Wisconsin, SUA 1991
94. |SD,85| Spînulescu I., Dima I., Pârvan R. - "Metode electronice în fizica experimentală", Editura Didactică și Pedagogică, București 1985

95. |SI,85| Spîulescu I. - "Fizica straturilor subțiri și aplicațiile acestora", Editura Științifică, București 1985
96. |SI,89| Spîulescu I. - "Fizica tranzistorilor și principiile microminiaturizării", Editura Didactică și Pedagogică", București 1989
97. |SL,91| *** "Microelectronic Equipment. Automatic Machines and Special Products", Prospectele firmei "SOUTH LONDON ELECTRICAL EQUIPMENT Co. Ltd.", England 1991
98. |SP,89| Spîulescu I., Pârvan R. - "Principiile fizice ale microelectronicii", Editura Științifică și Enciclopedică, București 1989
99. |SP,90| Spîulescu I., Popescu B. - "Studii prin efect de câmp asupra straturilor subțiri preparate prin pulverizare catodică reactivă", Lucrările Conferinței Anuale de Semiconductoare, Sinaia 1990
100. |SZ,93| Sears F. M. and Zemansky M. W. - "Thin Film Devices", Addison Wesley Book, USA 1993
101. |TS,88| Tolansky S. M. - "Multiple Beam Interferometry of Surfaces and Films", Oxford University Press, London 1988
102. |VA,86| Vaslcěk A. - "Optics of Thin Films", North Holland Publishing Company, Amsterdam 1986
103. |VA,89| *** "Thin Film Thickness Measurement and Calibration", Prospectele firmei VARIAN, Palo Alto Vacuum Division, California 1989
104. |VA,90| *** "Deposition Equipments", Prospectele firmei VARIAN AG, Switzerland 1990
105. |VA,91| *** "Monitor-controlor and Automatic Proces Control Equipments", Prospectele firmei VARIAN AG, Switzerland 1991
106. |VN,86| Vasile S., Orfescu D., Căldăraru F., Nicolaescu D. - "Experimental Results on Mo and Mo_xSi_y Films, for LSI Applications", Lucrările Conferinței Anuale de Semiconductoare, Sinaia 1986
107. |WS,87| Willardson R. K., Schwartz B. and Schwartz N. - "Measurement Techniques for Thin Films", The Electrochemical Society, New York 1987
108. |ZH,94| Zanin S. I. and Hooser G. E. - "Analysis of Plated Tape by X-ray Emmision Spectrography", IBM Corp. Components Division, New York 1994
109. |ZH,95| Zanin S. I., Lloyd C. J. and Hooser G. E. - "Nickelcrom Thin Film Analysis by X-ray Emission ", IBM Corp., Components Division, New York 1995