

Capitolul 7.2

Tehnologii peliculare Tehnologia straturilor subțiri (TSS)

Ciprian Ionescu

Conferențiar la Catedra Tehnologie Electronică și Fiabilitate,
Fac. Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației
Universitatea Politehnica din București



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

Tehnologii peliculare

- **Tehnologia straturilor subțiri (TSS)**
- **Tehnologia straturilor groase (TSG).**
- Tehnologiile peliculare cuprind acele metode și procedee de realizare a elementelor de circuit electronice sub forma unor pelicule (straturi) depuse pe un suport (substrat) dielectric.
- În literatura specifică acestui domeniu se utilizează noțiunile de "strat subțire" și "strat gros",
- Acești doi termeni determină și clasificarea principalelor tehnologii peliculare în Tehnologia straturilor subțiri (TSS) și Tehnologia straturilor groase (TSG).
- Delimitarea între un strat "subțire" și unul "gros" nu se face în mod strict după grosimea stratului ci în funcție de proprietăți și metodele de obținere.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

▪Un material se consideră că este sub formă de strat subțire atunci când principalele sale proprietăți fizice, în special cele electrice, sunt determinate de grosimea acestuia.

▪Pentru metale, grosimea straturilor subțiri este de ordinul de mărime al drumului liber mijlociu 50- 5000 Å. Grosimile maxime ale straturilor subțiri, în general, sunt mai mici de 10μm.

▪Un alt mod de a defini stratul subțire este legat de procedeele de obținere a peliculei: evaporarea termică, pulverizarea catodică, depunerea chimică din faza de vapori, oxidarea anodică, ș.a.

▪Strat gros este termenul care definește pelicula rezultată în urma depunerii unei paste pe un substrat, uzual prin procedeul numit serigrafie. În urma unui tratament termic, pastele capătă proprietățile electrice dorite fiind totodată fixate de substrat. Grosimea unor astfel de straturi este în general de ordinul a 10-20 μ m.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

⑩ Ambele tehnologii, atât TSS cât și TSG permit realizarea de elemente de circuit discrete (rezistoare, condensatoare, dispozitive active) sau se pot aplica la realizarea circuitelor integrate hibride.

Cele două tehnologii sunt recomandate pentru circuite tip "custom design" și în aplicații unde se cere o putere disipată medie spre mare, o tensiune de lucru mare sau unde sunt necesare componente pasive stabile și cu toleranțe foarte mici.

Mai recent, se pot utiliza ambele la realizarea de circuite pe suport flexibil cu paste polimerice, la celule fotovoltaice, dispozitive active OLED, OFET.

⑩ Tehnologia straturilor groase are avantajul unei investiții inițiale mici și al unui cost de producție și cercetare mai scăzut.

⑩ Tehnologia straturilor subțiri oferă cea mai bună stabilitate a componentelor.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

Criteriul de comparație	TSS	TSG
Capacitatea de a realiza rezistențe de valori mari	medie $R_s = 10, 1000 \Omega$	bună $R_s = 1 \Omega, 10 M \Omega$
Toleranța rezistențelor (după ajustare)	foarte bună $\pm 0,02\%$	bună $\pm 0,5\%$
Coeficientul de temperatură al rezistenței	foarte bun	bun $\pm (10,20) \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
Puterea disipată	medie	mare
Lățimea minimă a liniilor (spațiilor)	mică $< 25 \mu\text{m}$	medie $< 125 \mu\text{m}$
Cheltuieli la modificarea circuitului	mari	medii
Adaptabilitatea la automatizare	redușă	bună



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



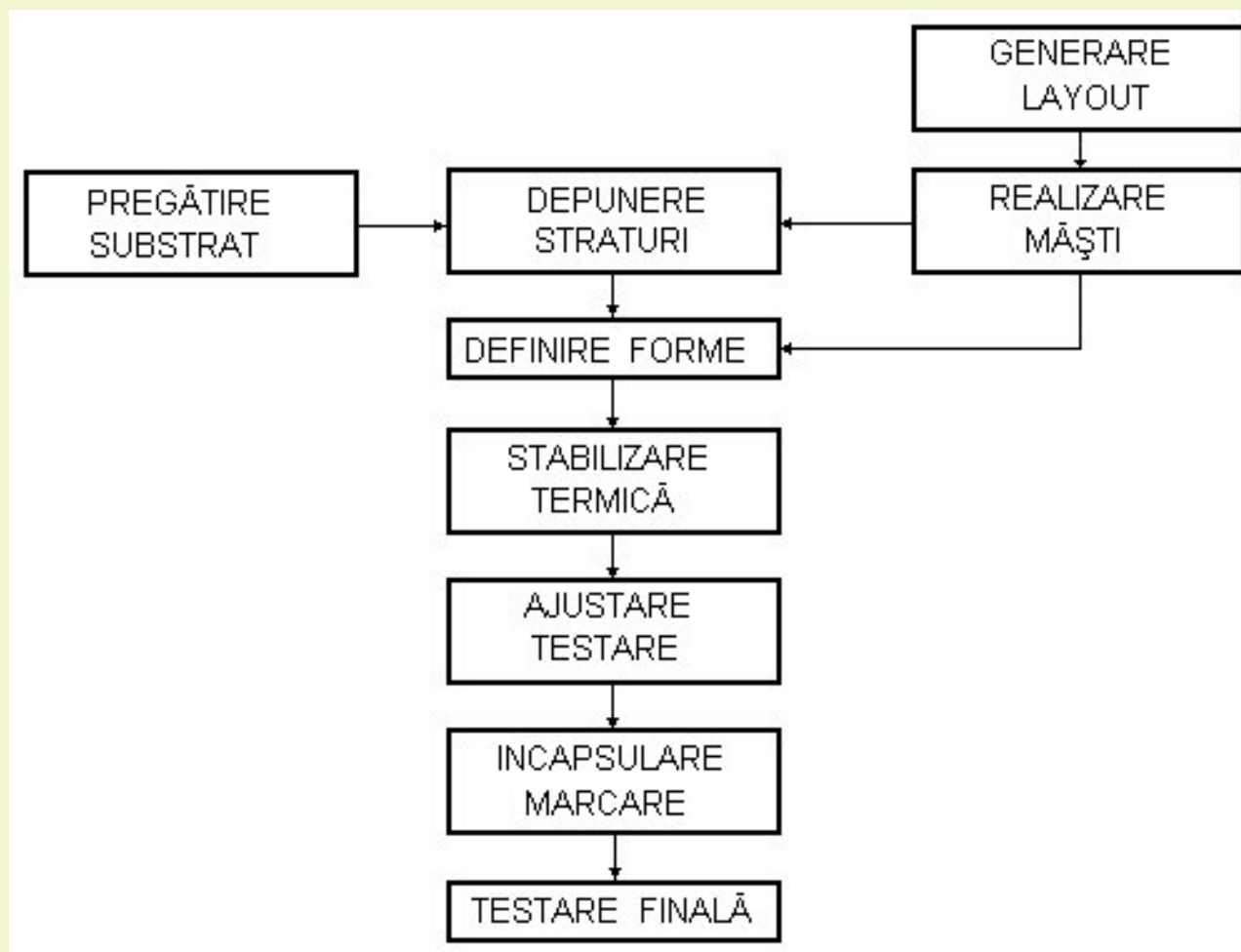
INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

10 REALIZAREA STRUCTURILOR CU STRATURI SUBȚIRI



ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

10 Principalele metode de depunere a straturilor subțiri

Metode fizice	Evaporarea termică
	Pulverizarea catodică
Metode chimice	Depunerea electrochimică
	Reducerea chimică
	Depunerea chimică din fază de vapori
	Anodizarea (Oxidarea anodică)

10 MBE- Molecular Beam Epitaxy – depunere fizico-chimică



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

Metoda	Rata de depunere (Å/s)	Controlul depunerii	Avantaje	Dezavantaje
Evaporare termică	$10 \cdot 10^3$	Temperatura sursei	Domeniu larg de aplicare	Necesită instalație de vid
Pulverizare catodică	10	Densitatea de curent, potențialul țintei	Aderență ridicată, gamă largă de materiale	Necesită instalație de vid și ținte plane
Depunere electrochimică	$<10^4$, uzual $10^2 \cdot 10^3$	Densitatea de curent	Aparatură accesibilă	Necesită substrat metalice
Reducere chimică	10	Temperatura și pH-ul soluției	Aparatură simplă	Număr limitat de materiale
Depunere din vapori	$1 \cdot 10^3$	Temperatura și presiunea gazului	Aplicabilă la monocristale, rezultă straturi pure	Necesită temperaturi mari ale substratului ($>1000^\circ\text{C}$) și sistem de control al gazului
Anodizare	10	Densitatea de curent	Aparatură accesibilă, permite realizarea de straturi amorfe, continue chiar la grosimi mici	Necesită substrat metalic, număr limitat de materiale, grosimea stratului limitată

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică

Investește în oameni!

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

10 Comparație între procedeele de depunere a straturilor subțiri

Tipul stratului	Dispozitiv, funcția de circuit	Procedeul de depunere					
		Evap. term.	Pulv. catod.	Dep. elchim.	Reduc. chim.	Dep. vapori	Anod.
Metalic	Conductoare	* *	*	*	*	*	
	Rezistoare	* *	*		*		
	Disp. magnetice	*	*	*	*		
	Supraconductoare	* *				*	
Compus metal/ dielectric	Rezistoare	*	* *			*	
Semicon- ductor	Rezistoare					* *	
	Disp. active	*	*			* *	
	Disp. fotoconductoare	*				* *	
Dielectric	Condensatoare	*	*				* *
	Izolatori	*	* *			*	* *
	Disp. optoelectronice	*	*				

* - posibilități de realizare

* * - metodă larg utilizată



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII ȘI PROTECȚIEI SOCIALE



FONDUL SOCIAL EUROPEAN



INSTRUMENTE STRUCTURALE

Aplicabilitatea metodelor de depunere

Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

Electronică

⑩ EVAPORAREA TERMICĂ

⑩ Procedul evaporării termice este utilizat pentru realizarea unei mari varietăți de straturi subțiri mergând de la straturi rezistive la cele conductoare, dielectrice și magnetice cu aplicații în circuitele electronice dar și în alte domenii cum ar fi straturile antireflex utilizate în optică, oglinzi, acoperiri decorative și multe altele.

⑩

⑩ Deși referit ca un proces unitar procesul depunerii prin evaporare constă din mai multe etape distincte:

⑩ a) tranziția materialului de depus dintr-o fază condensată (solidă sau lichidă) în faza gazoasă

⑩ b) deplasarea vaporilor substanței evaporate, la presiune scăzută de la sursa de evaporare către substrat

⑩ c) condensarea vaporilor la sosirea pe substrat



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

⑩ **(a) Procesul de vaporizare** a unei substanțe aflată într-o stare condensată este caracterizat de presiunea de vapori p_v .

⑩ Presiunea de vapori a unei substanțe reprezintă presiunea corespunzătoare echilibrului dinamic care se stabilește între procesul de evaporare și procesul de condensare. Cu alte cuvinte, p_v este presiunea la care cantitatea de material evaporată și cea condensată sunt egale. Această stare de echilibru este caracterizată de ecuația Clausius-Clapeyron:

$$\frac{dp_v}{dT} = \frac{H_g - H_c}{T(V_g - V_c)}$$

⑩ unde H_g , H_c reprezintă entalpia în stare gazoasă, respectiv condensată iar V_g , V_c volumele molare corespunzătoare

⑩ Dacă se neglijează volumul în stare condensată și se aplică totodată legea gazelor perfecte rezultă

$$V_g - V_c \cong V_g = \frac{RT}{p_v}$$

⑩ Diferența entalpiilor reprezintă căldura molară de vaporizare $\Delta_e H$. Ecuația devine:

$$\frac{dp_v}{p_v} = \frac{\Delta_e H}{R} \frac{dT}{T^2} \rightarrow \ln p_v = -\frac{\Delta_e H}{RT} + \text{const.}$$



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

- ⑩ Relația anterioară permite calculul presiunii de vaporii, însă rezultatele sunt valabile numai pentru intervale mici de temperatură în care $\Delta_e H$ este constantă.
- ⑩ Prin convenție se definește temperatura de vaporizare temperatura pentru care presiunea vaporilor atinge valoarea 10^{-2} torr.

Material	Al	Ag	Ta	Ni	Cr	Au	W
Temperatura de vaporizare (K)	1490	1300	3300	1800	1790	1670	3500

- ⑩ Trebuie remarcat că unele substanțe sublimează, lucru de care trebuie să se țină seama la alegerea sursei de evaporare.

⑩ Un alt parametru important pentru controlul depunerii este viteza de evaporare a moleculelor. Expresii verificate experimental ale vitezei de evaporare au fost obținute pornind de la teoria cinetică a gazelor bazată pe statistica Maxwell-Boltzmann. Se arată astfel că numărul de molecule dN_i , având masa m , care ciocnesc o suprafață A în unitatea de timp dt , cu alte cuvinte rata de impact Z , este

$$Z = \frac{dN_i}{A dt} = p(2\pi mkT)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{⑩ cu } p = \text{presiunea gazului, } k = \text{constanta lui Boltzmann}$$

⑩ Admițând în mod suplimentar că toate moleculele evaporate rămân în faza gazoasă putem considera $p \approx p_v$, și introducând masa molară M , rezultă viteza maximă de evaporare

$$Z = \frac{dN_i}{A dt} = 3,513 \times 10^{22} p_v (MT)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{⑩ (molecule } \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{)}$$

⑩ relația lui Langmuir



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

- ⑩ Prin înmulțire cu masa unei molecule exprimăm rata de evaporare a masei Γ

$$\Gamma = m \frac{dN}{A dt} = p_v \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Gamma = 5,834 \times 10^{-2} p_v \left(\frac{M}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{⑩ (g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$$

- ⑩ Din datele tabelate pentru $p_v = 10^{-2}$ torr, Γ este de ordinul a 10^{-4} g cm⁻² s⁻¹ pentru majoritatea elementelor utilizate la depuneri prin procesul de evaporare.

- ⑩ La viteze de vaporizare mari, fluxul de molecule emise poate fi suficient de dens pentru a apărea ciocniri între molecule, ciocniri care ar avea ca rezultat întoarcerea moleculelor spre materialul de evaporat.

- ⑩ Oxizii care se formează la suprafața materialului care se evaporă micșorează viteza de evaporare deoarece constituie o barieră greu permeabilă pentru moleculele evaporate.

- ⑩ O cale de creștere a vitezei de evaporare o constituie creșterea temperaturii sursei. Căldura, însă, trebuie transmisă materialului fără a se crea gradienti mari de temperatură și fără ca eliberarea gazelor înglobate să provoace împrăștierea materialului.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

⑩ b) După evaporare, **moleculele străbat distanța** ce separă sursa de substrat. Esențial pentru atingerea substratului de către un număr cât mai mare de molecule evaporate este ca presiunea în incintă să fie suficient de redusă, astfel încât moleculele evaporate să nu sufere ciocniri cu moleculele de gaz și să aibă o traiectorie rectilinie spre substrat.

⑩ Un parametru global care caracterizează ciocnirile dintre molecule este drumul liber mijlociu care se definește ca distanța medie dintre două ciocniri succesive:

$$\lambda = (n \pi d^2 \sqrt{2})^{-1}$$

$$\lambda = \frac{kT}{p \pi d^2 \sqrt{2}}$$

⑩ unde n-numărul de molecule pe unitatea de volum, d-diametrul moleculelor presupuse de formă sferică, p – presiunea, T- temperatura



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

⑩ Deoarece ciocnirile dintre molecule sunt fenomene statistice drumul real parcurs de o moleculă diferă, conform distribuției exponențiale:

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{l}{\lambda}\right)$$

⑩ unde N/N_0 reprezintă fracțiunea de molecule care nu au suferit ciocniri după parcurgere drumului l . Din analiza relației rezultă că numai 37 % (e^{-1}) dintre molecule ating o distanță egală cu drumul liber mijlociu și numai 1% din molecule o distanță egală cu $4,5 \lambda$.

⑩ În practică condiția care trebuie verificată este ca drumul liber mijlociu să fie mult mai mare decât distanța sursă substrat. La presiunile uzuale la care se realizează evaporarea $10^{-5} - 10^{-7}$ torr și la distanțe sursă substrat de $20 \div 50$ cm condiția amintită este în general îndeplinită.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

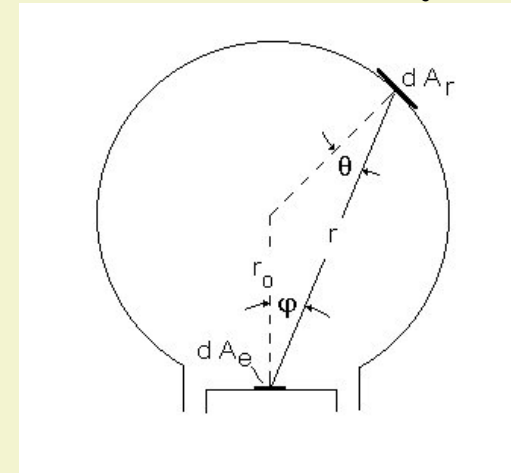
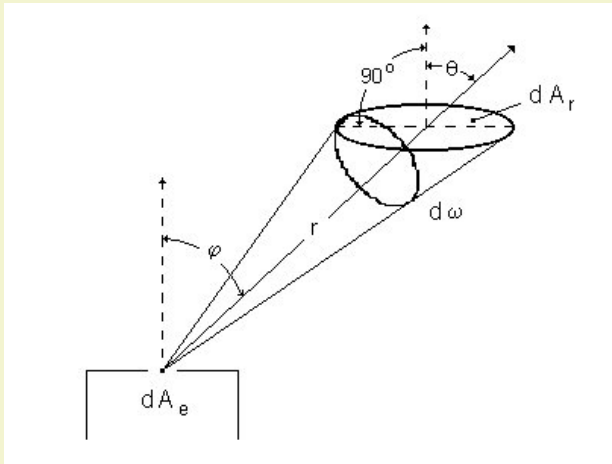
Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

⑩ Legea de emisie a moleculelor evaporate

⑩ Se arată că pentru o sursă având un mic orificiu de arie dA_e practicat în pereții cu grosime foarte mică, masa evaporată în unghiul solid $d\omega$ după direcția care face un unghi φ cu normala la incintă este:

$$dM_e(\varphi) = M_e \cos \varphi \frac{d\omega}{\pi}$$

⑩ iar M_e - masa totală evaporată se calculează cu relația:
$$M_e = \int \int_{t A_e} \Gamma dA_e dt$$



⑩ Suprafața pe care se realizează o depunere uniformă este o sferă cu sursa plasată într-un punct pe suprafața sa astfel încât $\cos \varphi = \cos \theta = r/2r_0$



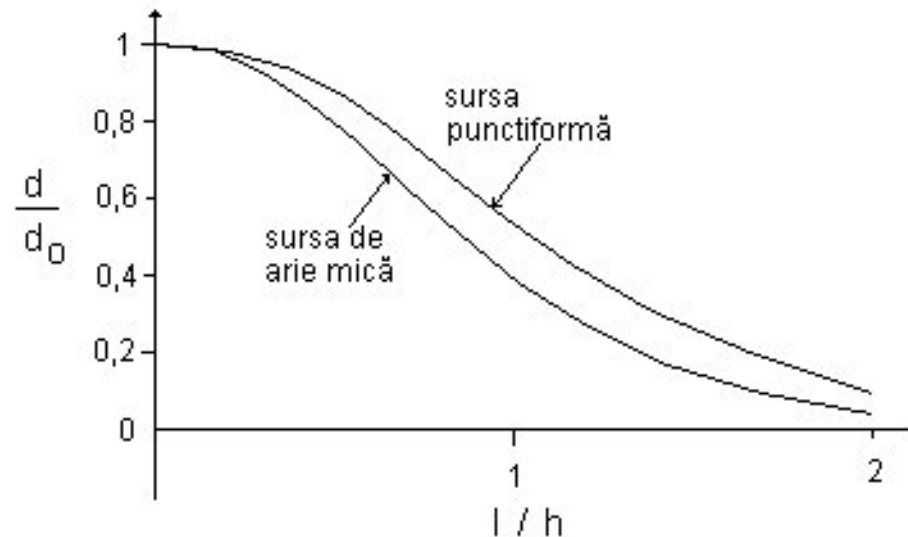
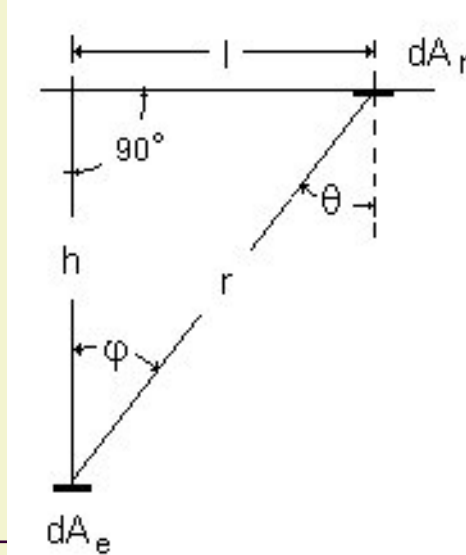
⑩ Distribuția grosimii straturilor subțiri obținute prin evaporare

⑩ Pentru situația uzuală în care substratul este plan și paralel cu planul suprafeței emiseive avem $\theta = \varphi$:

$$d = \frac{M_e}{\pi \rho h^2 \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

$$\frac{d}{d_0} = \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right]^{-3/2}$$

⑩ d- grosimea stratului



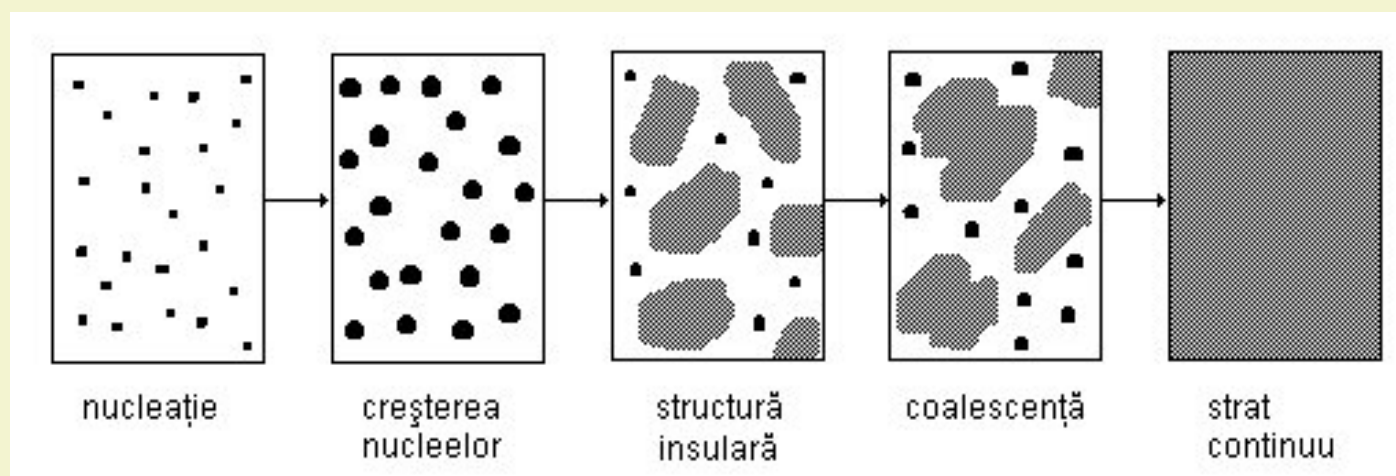
în Industria Electronică

⑩ C) creșterea straturilor subțiri

⑩ Cea de-a treia etapă a procesului de evaporare o constituie condensarea moleculelor evaporate pe substrat, substrat aflat la o temperatură mai scăzută decât temperatura de evaporare.

⑩ Condensarea este inițiată prin formarea de mici grăunțe prin combinarea atomilor adsorbiți, procesul formării grăunților - nuclee purtând numele de nucleație.

⑩ Două sau mai multe astfel de nuclee pot să se contopească procesul purtând numele de coalescență. O reprezentare a stadiilor succesive în creșterea unui strat este dată în figura următoare:



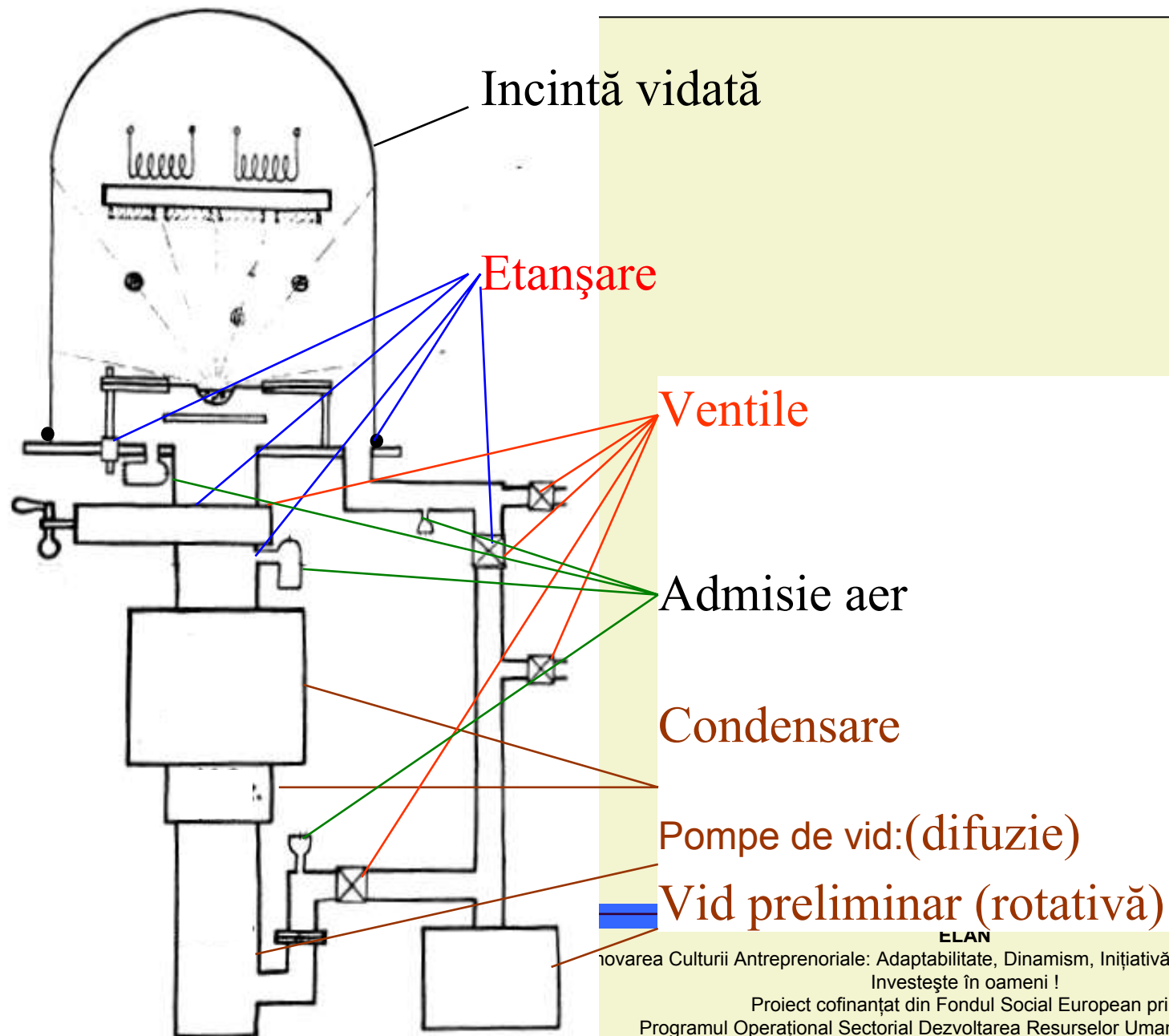
ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

- Fenomenul de nucleație are o influență determinantă asupra structurii viitorului strat.
- În funcție de temperatura substratului (influențează r_m - raza de migrație) și de natura materialului se pot obține materiale amorse (T_s mică, r_m mică) sau policristaline. De exemplu Si se obține amorf chiar la 300K în timp ce majoritatea metalelor dau o structură policristalină la temperatura camerei.
- Dacă substratul este monocristal și constanta de rețea a materialului de depus este apropiată de cea a substratului este posibil să apară fenomenul de epitaxie.
- Dacă se continuă evaporarea se constată că este posibil ca două nuclee vecine să se atingă având loc fenomenul de coalescență. Fenomenul de coalescență constă din contopirea a două nuclee care intră în contact, proces asemănător contopirii a două molecule de apă. Fenomenul poate fi explicat prin tendința de reducere a energiei de suprafață a noului nucleu format.
- În cazul straturilor policristaline, unde nucleele sunt distribuite aleator, se poate imprima o direcție preferențială a cristalitelor fiind astfel posibilă obținerea de texturi.
- Fenomenul de coalescență continuă, simultan cu o nucleație secundară, până când este realizat stratul continuu.

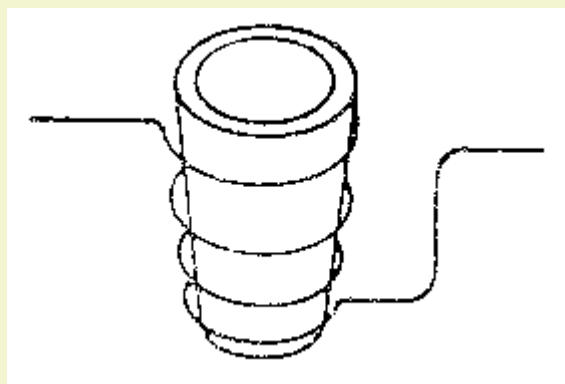
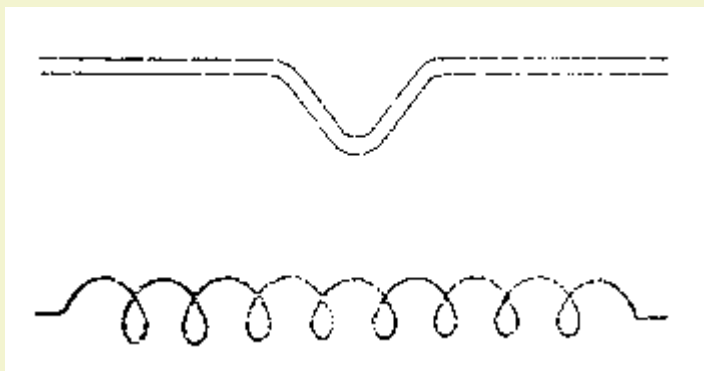
Schema unei instalații de depunere în vid



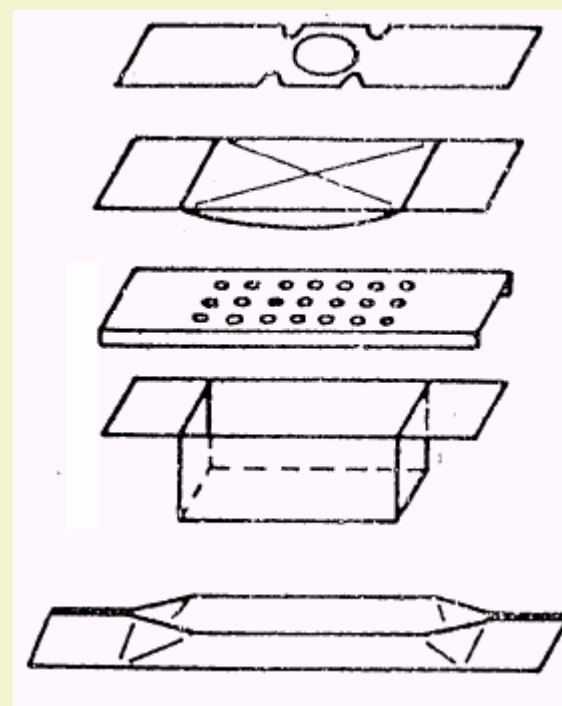


10 Surse de evaporare

10 Filament



10 Creuzet



10 Bărcuță

⑩ Realizarea straturilor subțiri prin pulverizare catodică (sputtering)

⑩ Pulverizarea catodică este un procedeu de a realiza straturi subțiri utilizat în special pentru materiale greu fuzibile (Ta, W) și materiale dielectrice.

⑩ Prin utilizarea pulverizării în atmosferă reactivă este posibil să se obțină straturi cu compoziție complexă (oxizi, nitruri) cu proprietăți rezistive și cu aplicații deosebite în microelectronică.

⑩ Procedul pulverizării constă în bombardarea materialului de depus, material numit în cele ce urmează țintă, cu particule având energii mari, de obicei ioni pozitivi ai gazelor inerte. Energiile mari necesare sunt obținute prin accelerare în câmp electric. Ca urmare a impactului, ionii accelerați smulg atomi de la suprafața țintei, atomi care se depun pe substrat.

⑩ Pentru depunerea materialelor dielectrice trebuie utilizat procedul pulverizării reactive sau pulverizării în radiofrecvență, deoarece se crează la suprafața țintei izolatoare un strat de sarcini pozitive care împiedică pulverizarea.

⑩ Principalul dezavantaj al pulverizării este viteza mică de depunere care se situează în intervalul $50 \div 3000 \text{ Å /min}$. Rate de depunere mai mari se pot obține prin răcirea țintei. Dacă se dorește mărirea vitezei de depunere și prin mărirea intensității descărcării, trebuie răcit și substratul ceea ce poate atrage după sine complicații importante ale instalației.

- ⑩ Procedul prezintă o serie de avantaje printre care amintim:
- ⑩ -rata de pulverizare (sau randamentul pulverizării) nu diferă mult în funcție de materialele utilizate: metale, aliaje sau chiar izolatori.
 - ⑩ -permite depunerea unor materiale dificil de depus prin alte metode cum ar fi: oțelul inoxidabil, materiale refractare, sticlă Pyrex, fără schimbarea compoziției chimice.
 - ⑩ -asigură depunerea de grosimi uniforme prin posibilitatea utilizării țintelor de arie mare.
 - ⑩ -permite formarea de oxizi și nitruri prin utilizarea pulverizării în atmosferă reactivă de oxigen sau azot.
 - ⑩ -prin polarizarea negativă a substratului se împiedică contaminarea cu oxigen a straturilor metalice depuse, rezultând astfel straturi de mare puritate.
 - ⑩ -este posibilă curățarea substraturilor prin bombardament ionic, fluxul de material de depus fiind oprit cu un obturator.
 - ⑩ -se elimină, față de evaporarea termică pericolul împrăștiării materialului și nu sunt restricții asupra sensului sau direcției în care se face depunerea.
(evaporarea se realizează obligatoriu de jos în sus)
 - ⑩ -țintele se pot utiliza la mai multe depuneri.

⑩ Mecanismul pulverizării

⑩ Se consideră că pulverizarea se realizează prin transferul momentului cinetic al ionilor accelerați către atomii de la suprafața țintei - modelul jocului de biliard. Astfel ionul incident ciocnindu-se de țintă (catod) nu scoate direct atomii de pe suprafața acesteia ci îi aduce în stare de excitație în jurul poziției de echilibru. Excitația se răspândește în rețeaua cristalină după direcțiile de densitate de împachetare maximă a atomilor. În caz că energia primită este mai mare decât energia de legătură, acest atom poate părăsi ținta. Această teorie este verificată de câteva observații experimentale, cum ar fi:

⑩ -distribuția atomilor nu este cosinusoidală, cum ar trebui în cazul unei evaporări locale

⑩ -dacă țintele sunt monocristaline se constată că atomii au direcții preferențiale de emisie ce coincid cu direcțiile de împachetare maximă ale rețelei cristaline.

⑩ -randamentul pulverizării definit ca raportul dintre numărul de atomi emiși și numărul de ioni incidenți nu depinde numai de energia atomilor incidenți ci și de masa acestora. Se constată o creștere în medie a randamentului de pulverizare odată cu creșterea masei atomilor incidenți, simultan cu o periodicitate ce corespunde tabelului periodic al elementelor. Maximele de randament corespund bombardării cu ioni gazelor inerte.

⑩ -există un prag al energiei ionilor sub care fenomenul nu are loc. Pentru majoritatea materialelor această energie corespunde unei tensiuni de accelerare de $20 \div 30$ V.

⑩ -randamentul pulverizării scade pentru energii foarte mari ale ionilor (peste 30.000 eV) datorită pătrunderii ionilor incidenți în profunzimea materialului țintei, pierzând în interior o parte din energie și nu la suprafață.

⑩ -bombardarea țintei cu electroni nu produce pulverizarea țintei chiar dacă electronii au energii foarte mari

⑩ Pentru estimarea vitezei de depunere (rata pulverizării) se poate utiliza relația stabilită pe căi semiempirice:

$$\Gamma \sim \frac{I \cdot U}{p \cdot d}$$

⑩ cu I curentul în descărcare, U tensiunea la care are loc descărcarea, p presiunea din incintă, d distanța catod - substrat

⑩ Producerea pulverizării se bazează pe descărcarea electrică luminoasă autoîntreținută. Aplicând o tensiune continuă între doi electrozi aflați la distanța d într-o incintă în care se găsește un gaz (de ex. argon) la presiune scăzută $p = 10^{-2}$ torr se constată că între electrozi va circula un curent I determinat de două procese:

- ionizarea gazului
- emisia de electroni secundari în urma ciocnirii ionilor de gaz accelerați



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013

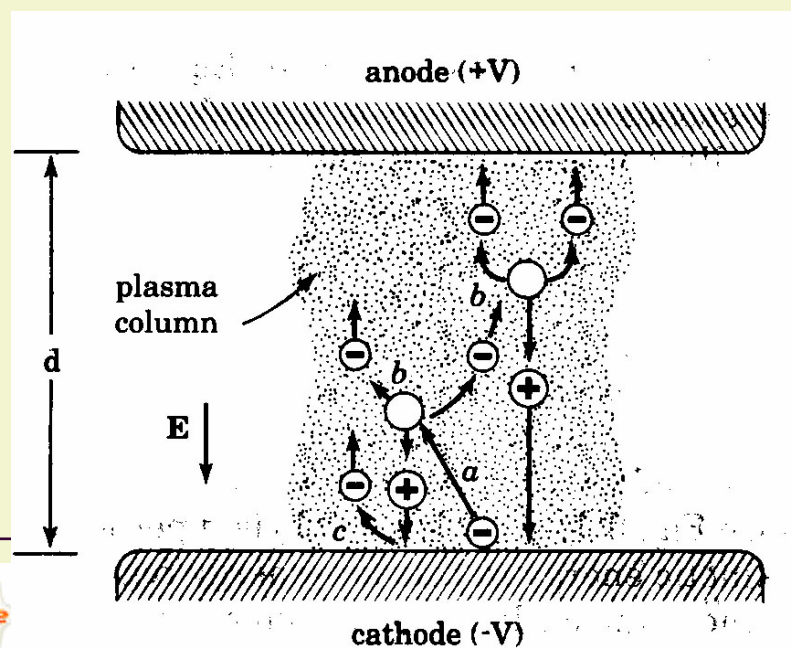
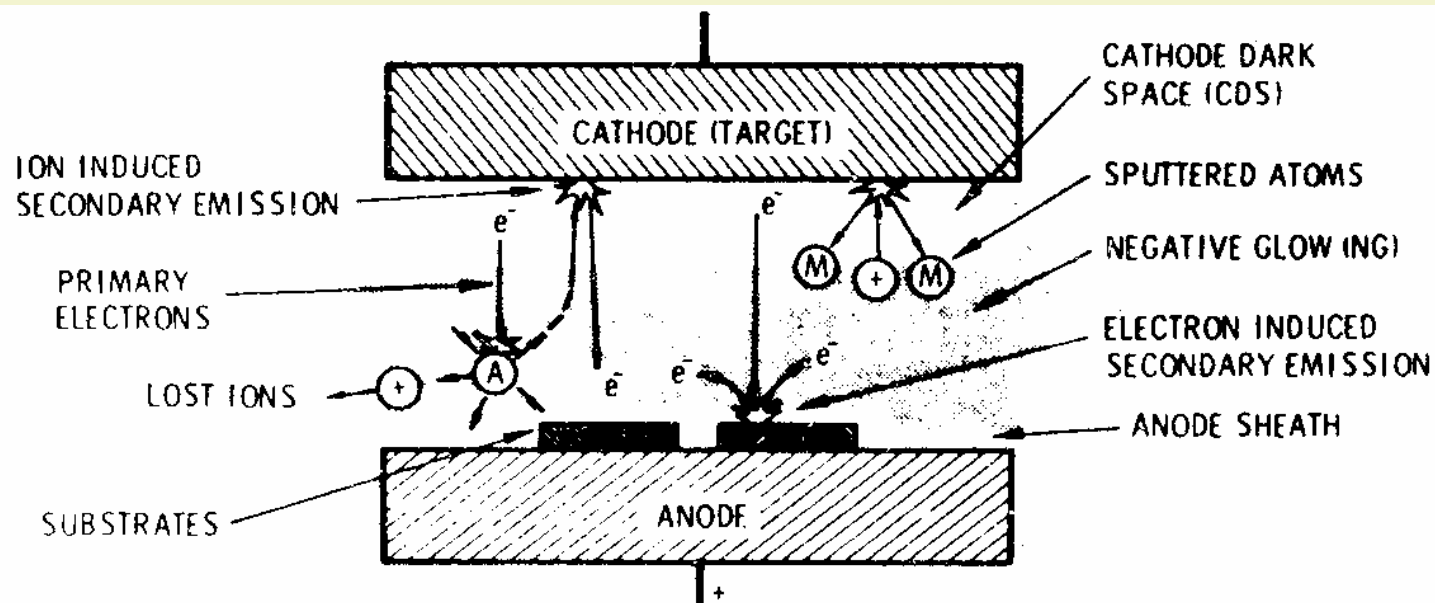


INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013



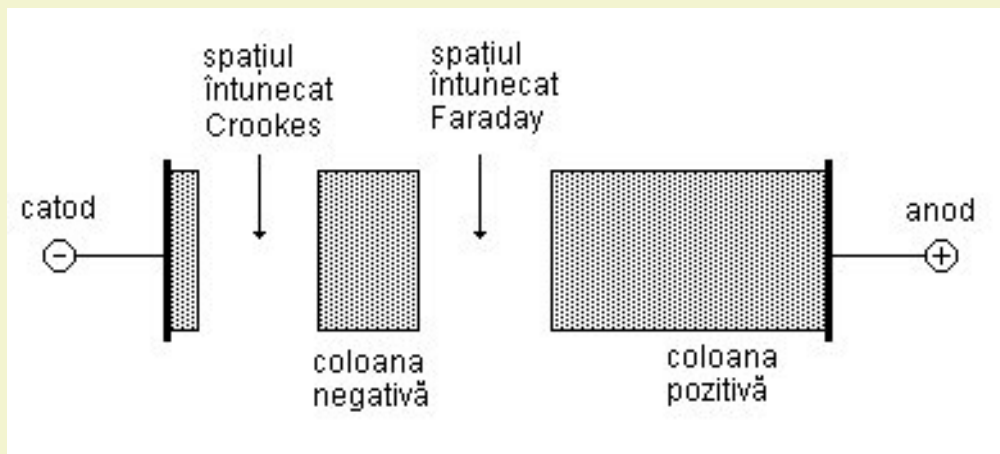
ELAN

abilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
te în oameni !

Fondul Social European prin

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

⑩ Dacă se vizualizează aspectul unei descărcări autoîntreținute se observă o succesiune de zone luminoase și întunecate



⑩ O regiune foarte importantă este spațiul Crookes. a cărei lățime este aproximativ distanța medie străbătută de un electron înainte de a ioniza prin ciocnire un atom de argon. Această zonă are o mare importanță practică deoarece o descărcare între un electrod situat în zona spațiului Crookes, electrod aflat la un potențial pozitiv egal cu potențialul anodic, și catod se stinge chiar pentru tensiuni foarte mari. Această observație este utilizată la ecranarea catodului cu un ecran aflat la o distanță corespunzătoare.

⑩ Pentru menținerea descărcării luminoase autoîntreținute este necesară o densitate de curent minimă care să asigure emisia de electroni secundari necesară. Corespunzător acestei densități de curent minime secțiunea transversală a descărcării este mică (la limită un punct pe suprafața catodului).

⑩ Pe măsură ce mărim puterea aplicată electrozilor secțiunea transversală a descărcării se mărește, curentul total crește, densitatea de curent rămânând constantă. În același timp căderea de tensiune pe spațiul Crookes rămâne constantă. Descărcarea electrică poartă în acest caz numele de descărcare luminoasă normală.

⑩ Crescând în continuare puterea aplicată electrozilor după ce descărcarea acoperă întreaga suprafață a catodului curentul nu mai poate crește decât pe seama măririi densității de curent. Acest regim de lucru poartă numele de descărcare **luminoasă anormală** și este modul de lucru utilizat la depunerea straturilor subțiri prin pulverizare deoarece în regim de descărcare normală densitatea de curent este prea mică pentru a permite pulverizarea catodului cu viteze acceptabile iar tensiunile corespunzătoare sunt prea mici ducând la randamente de pulverizare mici.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



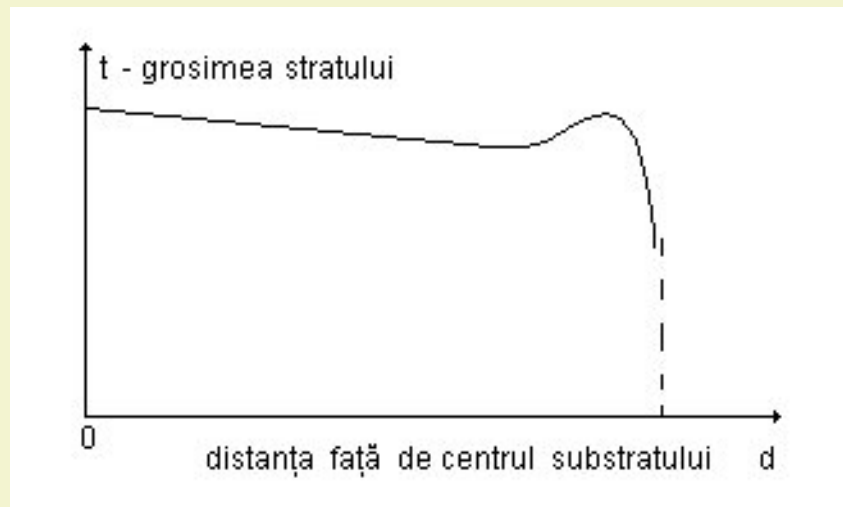
INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

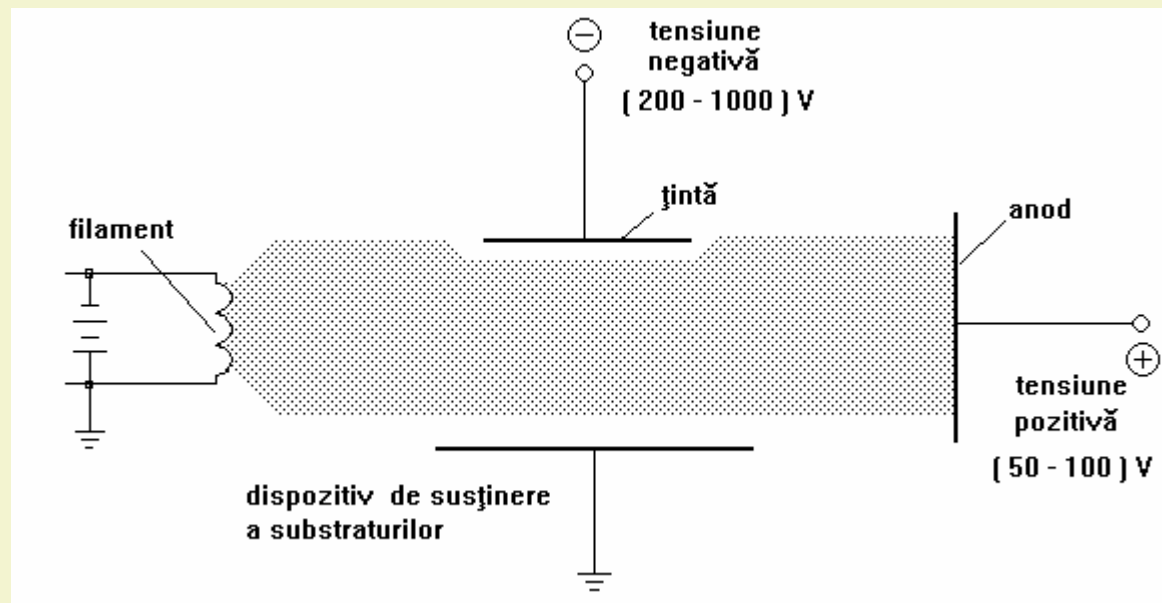
⑩ Distribuția grosimii materialului pulverizat depus pe substrat de la centru $x=0$ la margine $x=d$ este prezentată în figura următoare:



⑩ Se observă existența unui maxim în regiunea centrală și o supracreștere spre extremitatea substratului concomitent cu o corodare mai pronunțată a catodului (țintei) spre extremități. Această supracreștere se datorează creșterii densității de curent spre extremitatea catodului și faptului că ionii de argon ajung în acea regiune sub incidență oblică, randamentul de pulverizare fiind mai mare ca în zona centrală. Acest efect de mărire a pulverizării la extremitatea catodului poate fi redus măbind ecranul sau îndoindu-l astfel încât să acopere parțial catodul.

⑩ Descărcarea luminoasă întreținută pe cale termoionică

⑩ Una din metodele de susținere a descărcării este generarea de electroni de către un filament încălzit, în loc de a fi generați prin impact cu suprafața catodului, ca electroni secundari.



⑩ Schema unei instalații de pulverizare cu descărcare întreținută pe cale termoionică (sistem triodă)

⑩ Descărcarea luminoasă întreținută prin aplicarea unui câmp magnetic

⑩ Principiul metodei constă în creșterea eficienței de ionizare a electronilor existenți prin aplicarea unui câmp magnetic. Există două tehnici de aplicare a câmpului magnetic:

⑩ (a) câmp magnetic longitudinal (paralel cu câmpul electric)

⑩ (b) câmp magnetic transversal (perpendicular pe direcția câmpului electric)

⑩ În cazul (a), al aplicării unui câmp magnetic longitudinal, asupra electronilor, pe lângă efectul de accelerare electrostatică, se exercită suplimentar forța $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Influența câmpului magnetic asupra ionilor are un efect neglijabil datorită masei mari a acestora. Pentru electronii care se depasează paralel cu câmpul electric forța suplimentară este nulă. Acțiunea este evidențiată asupra electronilor cu componente ale vitezei în direcții diferite; este cazul electronilor din coloana negativă. Efectul este realizarea unei traiectorii spiralate în jurul câmpului magnetic aplicat, ceea ce duce la lungirea drumului străbătut de electroni, crescând astfel probabilitatea de ionizare.

⑩ Un alt efect util al aplicării unui câmp magnetic longitudinal este împiedicarea difuziei radiale a electronilor în afara plamei. Aplicarea unui câmp magnetic longitudinal este larg utilizată la pulverizare deoarece nu produce distorsionarea liniilor de câmp, permițând obținerea unor straturi subțiri uniforme.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

⑩ La aplicarea unui câmp magnetic transversal (b) are loc o deplasare a electronilor pe o traiectorie cicloidală. Prin alegerea corespunzătoare a valorii inducției câmpului magnetic, este posibil ca electronii să fie captați, ne mai putând continua drumul spre anod (efectul magnetron). În acest fel electronii produc foarte multe ionizări, rezultând o creștere puternică (cca. 2 ordine de mărime) a curentului prin circuit, iar ca rezultat final o creștere apreciabilă a vitezei de depunere.

⑩ În aplicații trebuie însă modificată geometria instalației pentru a căpăta o formă cilindrică, deoarece câmpul magnetic transversal produce zone cu intensități mari în descărcare spre extremitățile țintei.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013

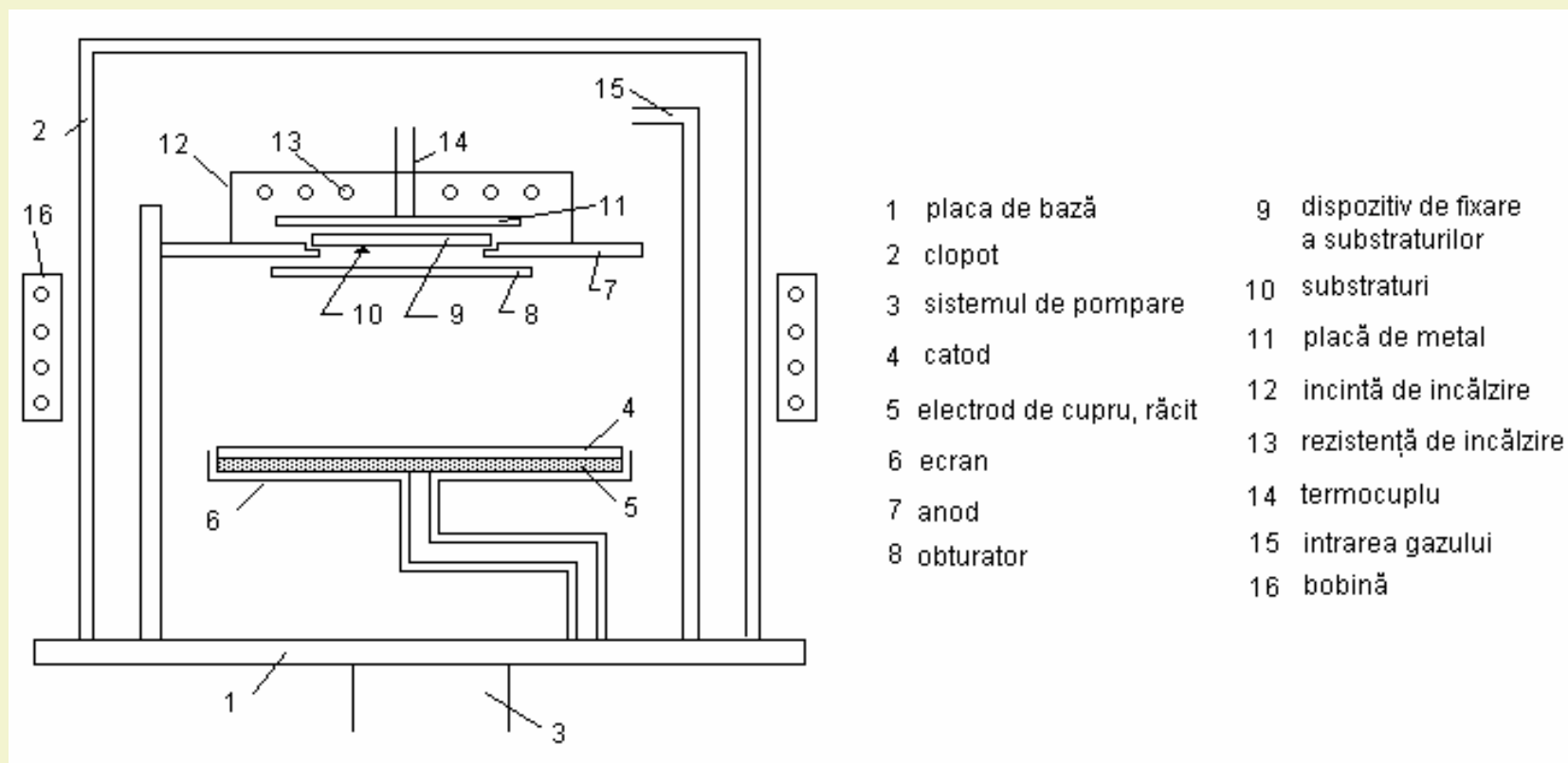


INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013



10 Instalație de pulverizare tip diodă



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOS DRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013