

3. Uniformitatea acoperirilor optice

(extras din teza de doctorat)

Realizarea fizică a acoperirilor pe suprafețele componentelor optice de diferite forme nu conduce de cele mai multe ori la o acoperire uniformă (grosimile geometrice ale straturilor care compun acoperirea optică nu au aceeași valoare în fiecare punct al suprafeței). Atunci când se studiază comportarea spectrală a unor acoperiri optice într-un sistem optic particular trebuie să cunoaștem și uniformitatea acoperirilor optice pe suprafețele dioptrilor aceluși sistem optic. Se analizează în continuare uniformitatea straturilor subțiri pe suprafețe care pot fi descrise cu o cuadrică, straturi realizate în instalații de vid în care avem surse (creuzete din care se evaporă materialul stratului subțire) cu proprietăți cunoscute, iar suprafața pe care se realizează acoperirea are o mișcare de rotație sau o mișcare de tip planetar. Se va aborda mișcarea de tip planetar pentru că ea le include drept cazuri particulare pe celelalte.

3.1 Determinarea uniformității straturilor subțiri obținute pe suprafețe asferice în geometria tip sistem planetar

Geometria de evaporare a unei instalații de vid în care suprafața are o mișcare de tip planetar, și unde sistemul de control al grosimilor straturilor subțiri este de tip fotometric, este reprezentată în Fig. 3.1. Sunt reprezentate două sisteme de referință: unul fix $(\mathbf{O}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ legat de instalație, și unul mobil, legat de suprafața cuadricei $(\mathbf{O}', \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$. Sistemul $(\mathbf{O}', \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ are originea pe versorul \mathbf{e}_3 la distanța h față de \mathbf{O} , iar versorul \mathbf{f}_1 se rotește într-un plan paralel cu planul $(\mathbf{e}_1, \mathbf{O}, \mathbf{e}_2)$. Versorul \mathbf{f}_3 este paralel cu axa de simetrie a cuadricei. Cuadrica poate fi și excentrică, între axa de simetrie a cuadricei și versorul \mathbf{f}_3 fiind distanța e . Unghiul dintre versorul \mathbf{e}_3 și \mathbf{f}_3 este $\pi - \alpha$ cu α constant. Sistemul de referință $(\mathbf{O}', \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ se rotește în jurul versorului \mathbf{e}_3 cu viteza unghiulară ω . Cuadrica se rotește în jurul versorului \mathbf{f}_3 cu viteza unghiulară $\omega_1 = k \omega$, unde k este o constantă. Sursa de evaporare se consideră poziționată de vectorul de poziție $\mathbf{s}(s^1, s^2, s^3)$.

Controlul grosimii straturilor subțiri se face măsurând factorul de reflexie și/sau transmisie al acoperirii optice realizate pe o lama test (de regulă fixă). Grosimile geometrice ale straturilor subțiri într-un punct \mathbf{P} de pe suprafața componente optice nu au aceleași valori cu cele de pe lama test. Se consideră ca straturile pe lama test sunt uniforme. Pentru o anumită sursă, aceste grosimi geometrice sunt într-un raport, numit coeficientul geometric al punctului \mathbf{P} , \mathbf{c}_p :

$$\mathbf{c}_p = \mathbf{g}_p / \mathbf{g}_L$$

unde : \mathbf{g}_p - grosime geometrică a stratului în \mathbf{P} ;

\mathbf{g}_L - grosime geometrică a stratului pe lama test.

Uniformitatea straturilor va fi caracterizată cu ajutorul coeficientului geometric.

Considerăm o sferă mică, de suprafață elementară $d\mathbf{S}_1$, din materialul evaporat, cu o rată de evaporare constantă m [kg/sec] în toate direcțiile. O astfel de sursă de evaporare este numită sursă punctiformă. Cantitatea de material care trece prin unghiul solid $d\omega$ în orice direcție în unitatea de timp este dată de^[1]:

$$dm = \frac{m}{4\pi} d\omega \quad (3.1)$$

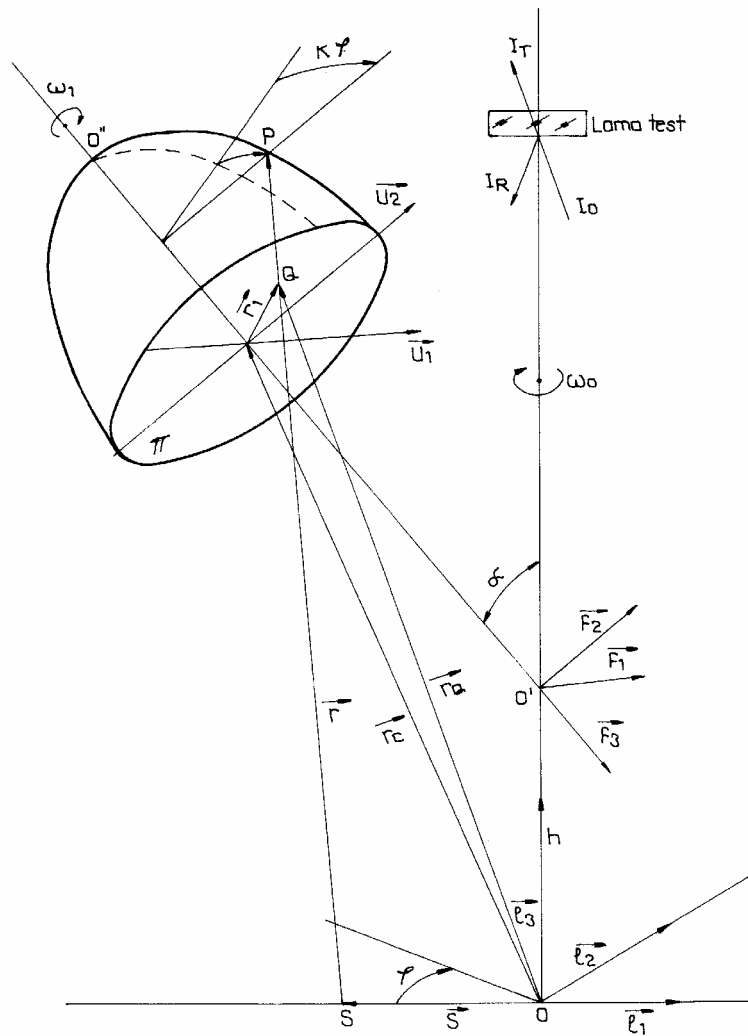


Fig 3.1 Reprezentarea geometriei de evaporare tip sistem planetar

Considerăm o suprafață elementară dS_1 din care materialul este evaporat la o rată de m [kg/sec]. Cantitatea de material care trece prin unghiul solid $d\omega$ într-o direcție care formează unghiul Φ cu normala la suprafață, în unitatea de timp, este dată de:

$$dm = \frac{m}{\pi} \cos \phi d\omega \quad (3.2)$$

Dacă materialul evaporat se depune pe elementul de suprafață dS_2 , înclinat la unghiul θ față de direcția fascicolului de vapori (vezi Fig. 3.2), atunci putem calcula grosimea geometrică și cantitatea de material depusă pe elementul de suprafață. Având:

$$d\omega = \frac{\cos\theta}{r^2} dS_2 \quad (3.3)$$

atunci rata de depunere a materialului pe elementul de suprafață dS_2 este:

$$dm = \frac{m \cos\theta}{4\pi r^2} dS_2 \quad (3.4)$$

pentru cazul sursei punctiforme, și:

$$dm = \frac{m \cos\phi \cos\theta}{\pi r^2} dS_2 \quad (3.5)$$

repspectiv pentru cazul sursei plane. Presupunem ca materialul evaporat are densitatea ρ [kg/m³], și grosimea stratului condensat în unitatea de timp (rata de depunere) q [m/sec], atunci volumul de material depus pe dS_2 este $q dS_2$ astfel încât $dm = \rho \cdot q \cdot dS_2$. Rata de depunere se poate scrie ca:

$$q = \frac{m \cos\theta}{4\pi\rho r^2} \quad (3.6)$$

și

$$q = \frac{m \cos\phi \cos\theta}{\pi\rho r^2} \quad (3.7)$$

pentru sursa punctiformă, respectiv pentru sursa plană. Pentru geometrii de evaporare simple (suprafața pe care se depune materialul este un plan sau calotă sferică, fixă sau în rotație, distribuția grosimii geometrice pe suprafață se poate face analitic^[1]. Atunci când suprafața este mai complicată și de asemeni are loc o mișcare mai complexă, nu se mai poate deduce analitic distribuția grosimii straturilor subțiri. În acest din urmă caz se folosesc metode numerice^[2].

Evaluarea grosimii geometrice într-un punct P se face numeric, evaluând rata de depunere a materialului în punctele succesive care descriu mișcarea. Pentru evaluarea ratei de depunere trebuie determinați: vectorul de poziție \mathbf{r} care unește sursa și punctul P de pe suprafață, normala \mathbf{n} la suprafața cuadrice în punctul P și normala la sursă (care este constantă). Pentru o sursă plană, rata de depunere în punctul P este proporțională cu

$$q_P = c \frac{\cos(\phi_P) \cos(\theta_P)}{r_P^2} \quad (3.8)$$

unde c este o constantă, θ_P este unghiul dintre normală la suprafața cuadrice în punctul P și vectorul \mathbf{r}_P , ϕ_P este unghiul între normala la suprafața sursei și vectorul \mathbf{r} . Având în vedere geometriile de evaporare folosite în instalațiile de vid, se poate neglija dimensiunea sursei, considerând-o sursă elementară. Deoarece între mișcarea de rotație și mișcarea de revoluție este o dependență strictă:

$$\omega_1 = k \cdot \omega \quad (3.9)$$

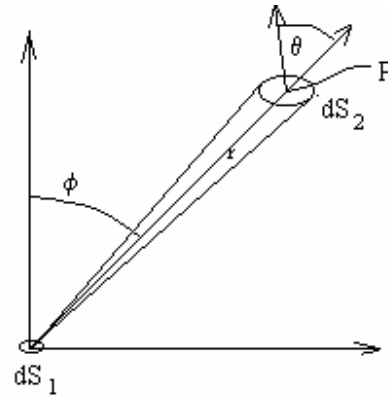


Fig. 3.2. Ilustrarea notatiilor folosite

poziția punctului \mathbf{P} pe durata mișcării depinde numai de unghiul de rotație φ în jurul versorului \mathbf{e}_3 , $\varphi = \omega \cdot t$, unde t este timpul. Se consideră că la $t=0$ punctul \mathbf{P} , versorii $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3, \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_3$, sursa \mathbf{S} sunt în același plan. Relația (3.7) poate fi scrisă ca:

$$q_\varphi = c \frac{\cos(\gamma_\varphi) \cdot \cos(\delta_\varphi)}{r_\varphi^2} \quad (3.10)$$

unde φ este unghiul parcurs în timpul t de versorul \mathbf{f}_1 . Grosimea g_p realizată pe suprafața cuadricei în punctul \mathbf{P} pentru o rotație completă este:

$$g_p = c \int_0^{2\pi} q_\varphi d\varphi \quad (3.11)$$

Se studiază uniformitatea stratului pe meridianul și paralela suprafeței care conțin punctul \mathbf{P} . Fata de desen se introduce excentricitatea cuadricei e , care semnifica distanța dintre axa cuadricei și axa $O'O$. Dacă pozițiile punctului \mathbf{P} pentru $\varphi=0, 2\pi, 4\pi, \dots$ și $e=0$ coincid, atunci punctele de pe paralela care conțin punctele \mathbf{P} nu au aceleași grosimi (nu au același parcurs). Pentru ca punctele de pe paralelă să își piardă identitatea (să aibă aceleași grosimi) trebuie ca raportul $k=\omega_1/\omega$ să fie un număr irațional, astfel încât, după un număr relativ mare de rotații complete, toate punctele de pe paralelă, la pozițiile $\varphi=2k\pi$, $k=1, 2, 3, \dots$, să treacă prin poziția inițială a lui \mathbf{P} . Dacă $e \neq 0$ atunci nu se poate obține uniformitate pe paralelă. În cazul reprezentat în Fig. 3.1, dacă suprafața este concavă și are o săgeată mare, este posibil ca pentru anumite valori ale lui φ , punctul \mathbf{P} să nu vadă sursa, poziții în care rata de depunere este zero. Condiția ca punctul \mathbf{P} să vadă sursa este ca vectorul de poziție care uneste sursa de punctul \mathbf{P} să treacă prin deschiderea cuadricei. Calculul analitic al uniformității stratului subțire pe diverse suprafețe se poate face numai pentru un număr restrâns de cazuri particulare. De aceea se va aborda rezolvarea numerică a problemei^[2]. Considerând că piesa se rotește în jurul lui \mathbf{e}_3 în n_1 pași relativ mici $\Delta\varphi$, pentru fiecare pas având o rată de depunere constantă în punctul \mathbf{P} . Grosimea g_p realizată după n pași în care punctul \mathbf{P} vede sursa ($n \leq n_1$) este:

$$g_p = \sum_{i=0}^n q_i = c \sum_{i=0}^n \frac{\cos(\gamma_{\varphi_i}) \cdot \cos(\delta_{\varphi_i})}{r_{\varphi_i}^2} \quad (3.12)$$

Grosimea g_L realizată pe lama test (în centrul lamei test) în același timp este:

$$g_L = n_1 c \frac{\cos^2(\gamma)}{r_t^2} \quad (3.13)$$

Coeficientul geometric pentru punctul \mathbf{P} este:

$$c_p = \frac{g_p}{g_L} = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{\cos(\gamma_{\varphi_i}) \cdot \cos(\delta_{\varphi_i})}{r_{\varphi_i}^2}}{n_1 \frac{\cos^2(\gamma)}{r_t^2}} \quad (3.14)$$

unde $n_1 \geq n$ (lama test nu este obturată). În sistemul $(\mathbf{O}, \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ se definește cuadricea^[3]:

$$H_{(p)} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i x^j + 2 \sum_{i=0}^3 b_i x^i + c = 0 \quad (3.15)$$

cu $a_{ij} = a_{ji}$. Se definește pe cuadricea punctul \mathbf{P} de coordonate (x_0^1, x_0^2, x_0^3) . Planul tangent la cuadricea în punctul \mathbf{P} are ecuația:

$$\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i x_0^j + \sum_{i=0}^3 b_i (x^i + x_0^i) + c = 0 \quad (3.16)$$

care poate fi scrisă ca:

$$\sum_{i=0}^3 a_i x^i + b = 0 \quad (3.17)$$

cu a_i descriind orientarea vectorului normal la planul tangent:

$$n = \sum_{i=0}^3 a_i f^i \quad (3.18)$$

La pasul i , quadrica se rotește în jurul lui \mathbf{f}_3 cu unghiul $\beta = i \cdot k \cdot \Delta\varphi$. Aceasta poate fi considerată ca o transformare centro-afină^[3] de matrice

$$[s_i^j] = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Noile coordonate ale lui \mathbf{P} în sistemul $(\mathbf{O}', \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ devin:

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{bmatrix} = [s_i^j] \begin{bmatrix} x_0^1 \\ x_0^2 \\ x_0^3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

iar coordonatele normalei devin:

$$\begin{bmatrix} a_1' \\ a_2' \\ a_3' \end{bmatrix} = [s_i^j] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Sistemul de coordonate $(\mathbf{O}', \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ s-a rotit în acest timp în jurul lui \mathbf{e}_3 cu unghiul $\varphi = i \cdot \Delta\varphi = \omega \cdot t$. Matricea transformării este:

$$[b_i^j] = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos\alpha \sin\varphi & \sin\alpha \sin\varphi \\ \sin\varphi & -\cos\alpha \cos\varphi & -\sin\alpha \cos\varphi \\ 0 & \sin\alpha & -\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

La $t = 0$ s-a considerat că $\mathbf{f}_1, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3$ sunt în același plan.

Coordonatele punctului $\mathbf{P}(y^1, y^2, y^3)$ din sistemul $(\mathbf{O}', \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3)$ devin $\mathbf{P}(x^1, x^2, x^3)$ în sistemul $(\mathbf{O}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$:

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{bmatrix} = [b_{i1}^j] \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ y^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

iar normala \mathbf{n} devine:

$$\begin{bmatrix} n^1 \\ n^2 \\ n^3 \end{bmatrix} = [b_i^j] \begin{bmatrix} a_1' \\ a_2' \\ a_3' \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Fie sursa \mathbf{S} de coordonate (s^1, s^2, s^3) exprimate în sistemul de referință $(\mathbf{O}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$. Distanța SP este:

$$\overline{SP} = |\vec{r}| = \sqrt{(x^1 - s^1)^2 + (x^2 - s^2)^2 + (x^3 - s^3)^2} \quad (3.25)$$

Versorul \mathbf{u} al vectorului \mathbf{r} are cosinșii directori dați de relațiile:

$$\cos \alpha = \frac{x^1 - s^1}{|\vec{r}|}, \cos \beta = \frac{x^2 - s^2}{|\vec{r}|}, \cos \gamma = \frac{x^3 - s^3}{|\vec{r}|} \quad (3.26)$$

Unghiul dintre \mathbf{n} și \mathbf{u} este:

$$\cos \theta_p = \frac{\vec{n}\vec{u}}{|\vec{n}||\vec{u}|} = \frac{n^1 \cos \alpha + n^2 \cos \beta + n^3 \cos \gamma}{\sqrt{(n^1)^2 + (n^2)^2 + (n^3)^2}} \quad (3.27)$$

Iar unghiul dintre normala la planul sursei (dacă sursa este plană) și rază \mathbf{r} este:

$$\cos \phi_p = \frac{\vec{u}\vec{e}_3}{|\vec{u}||\vec{e}_3|} = \cos \gamma \quad (3.28)$$

Dacă acoperirea optică se realizează pe suprafața convexă și considerăm normala spre exteriorul cuadricei, atunci punctul \mathbf{P} vede sursa numai dacă $\cos \theta_p > 0$.

Acum avem toate mărimile pentru a determina rata de evaporare în orice moment al mișcării. Urmează să testăm dacă vectorul \mathbf{r} trece prin deschiderea cuadricei. Se notează cu Π planul care conține deschiderea cuadricei. Se definește o bază ortonormată în planul Π din vectorii \mathbf{u}_1 și \mathbf{u}_2 , cu $\mathbf{u}_1 \parallel \mathbf{f}_1$, $\mathbf{u}_2 \parallel \mathbf{f}_2$. Punctul \mathbf{Q} care precizează intersecția vectorului \mathbf{r} cu planul Π se definește prin vectorul de poziție \mathbf{r}_q unde \mathbf{r}_q poate fi scris ca:

$$\mathbf{r}_q = \mathbf{r}_c + \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_c + t_1 \mathbf{u}_1 + t_2 \mathbf{u}_2 = \mathbf{r}_c + t_1 \mathbf{f}_1 + t_2 \mathbf{f}_2 \quad (3.29)$$

unde \mathbf{r}_c este vectorul de poziție al centrului deschiderii cuadricei. Versorii \mathbf{f}_1 și \mathbf{f}_2 pot fi exprimați în sistemul $(\mathbf{O}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$ ca fiind:

$$\vec{f}_1 = \sum_{j=1}^3 b_1^j \vec{e}_j, \quad \vec{f}_2 = \sum_{j=1}^3 b_2^j \vec{e}_j \quad (3.30)$$

Coordonatele punctului \mathbf{Q} devin:

$$\begin{bmatrix} q^1 \\ q^2 \\ q^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c^1 + t_1 b_1^1 + t_2 b_2^1 \\ x_c^2 + t_1 b_1^2 + t_2 b_2^2 \\ x_c^3 + t_1 b_1^3 + t_2 b_2^3 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Vectorul de poziție \mathbf{r}_q mai poate fi scris ca:

$$\mathbf{r}_q = \mathbf{s} + t_3 \mathbf{u} \quad (3.32)$$

unde \mathbf{u} este versorul vectorului \mathbf{r} determinat mai sus. Coordonatele punctului \mathbf{Q} pot fi scrise ca fiind:

$$\begin{bmatrix} q^1 \\ q^2 \\ q^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^1 + t_3 \cos \alpha \\ s^2 + t_3 \cos \beta \\ s^3 + t_3 \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Având relațiile (3.31) și (3.33) putem scrie:

$$\begin{bmatrix} x_c^1 + t_1 b_1^1 + t_2 b_2^1 \\ x_c^2 + t_1 b_1^2 + t_2 b_2^2 \\ x_c^3 + t_1 b_1^3 + t_2 b_2^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^1 + t_3 \cos \alpha \\ s^2 + t_3 \cos \beta \\ s^3 + t_3 \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{cases} b_1^1 t_1 + b_2^1 t_2 - \cos \alpha t_3 = s^1 - r_c^1 \\ b_1^2 t_1 + b_2^2 t_2 - \cos \beta t_3 = s^2 - r_c^2 \\ b_1^3 t_1 + b_2^3 t_2 - \cos \gamma t_3 = s^3 - r_c^3 \end{cases} \quad (3.35)$$

Condiția ca raza să treacă prin deschiderea cuadrice de rază δ este:

$$t_1^2 + t_2^2 < \delta^2 \quad (3.36)$$

Această relație se aplică atunci când acoperirea se realizează pe suprafața concavă (interioară). Pentru suprafața convexă (exterioară) condiția este ca:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u} < 0 \quad (3.37)$$

unde \mathbf{n} este orientat spre exteriorul cuadrice.

Având la baza teoria prezentată mai sus s-au realizat funcții software, incluse în aplicația Windows 3.1, STRAT V5.2, pentru determinarea uniformității straturilor obținute în geometrii tip planetar, funcții cu care se face analiza care urmează.

Geometria tip sistem planetar trebuie să cuprindă drept cazuri particulare geometriile de evaporare tip: plan, cupolă sferică, cupolă conică și piramidală. Deoarece pentru unele dintre aceste tipuri de geometrii de evaporare se poate determina analitic distribuția grosimii straturilor subțiri, acestea constituie cazuri cu care se poate verifica algoritmul pentru geometria de tip sistem planetar.

3.2 Suport plan

Se consideră că suprafața pe care se realizează acoperirea este plană, perpendiculară pe axa de rotație a planului (Fig 3.3).

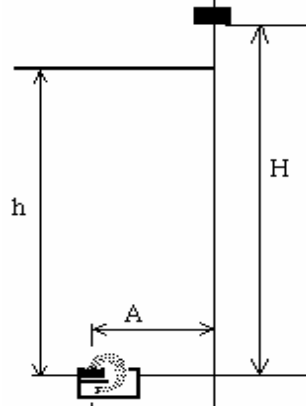


Fig.3.3 Evaporare pe un suport plan

Grosimea geometrică realizată pe plan, într-un punct \mathbf{P} poziționat față de axa de rotație prin raza r , este dată de ecuația^[1]:

$$g_P = \frac{mh^2}{2\rho\pi} \frac{2h^2 + (A+r)^2 + (A-r)^2}{(h^2 + (A+r)^2)^{3/2} (h^2 + (A-r)^2)^{3/2}} \quad (3.38)$$

Grosimea geometrică realizată pe lama test este:

$$g_L = \frac{mH^2}{\rho\pi} \frac{1}{(H^2 + A^2)^2} \quad (39)$$

Coefficientul geometric al punctului este dat de relația:

$$c_P = \frac{g_P}{g_L} = \frac{(H^2 + A^2)^2 h^2}{2H^2} \frac{2h^2 + (A+r)^2 + (A-r)^2}{(h^2 + (A+r)^2)^{3/2} (h^2 + (A-r)^2)^{3/2}} \quad (3.40)$$

Considerăm geometria: $H=590\text{mm}$, $h=500\text{mm}$, $A=210\text{mm}$. În Fig. 3.4 sunt reprezentați coeficienții geometrici calculați cu ajutorul relației (3.40).

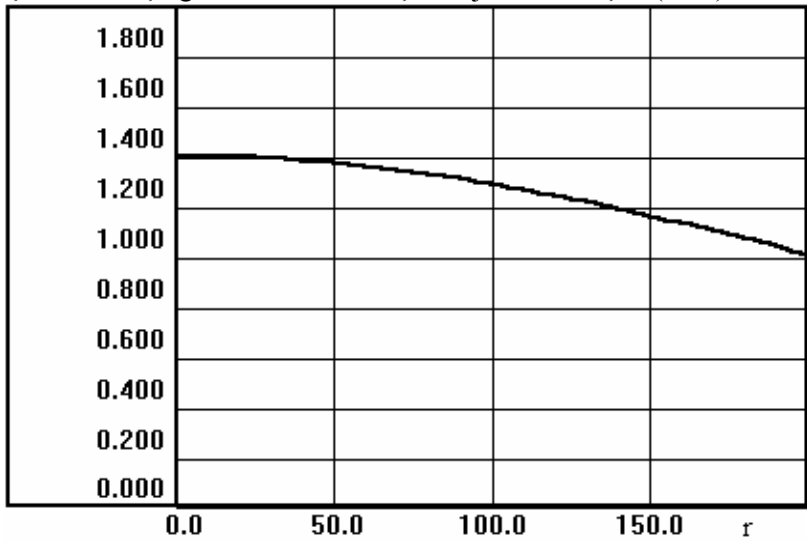


Fig. 3.4 Geometrie tip plan; determinare conform relației (40)

iar în Fig.3.5 cu algoritmul pentru geometria de tip planetar pentru care cuadrica degenerază în plan.

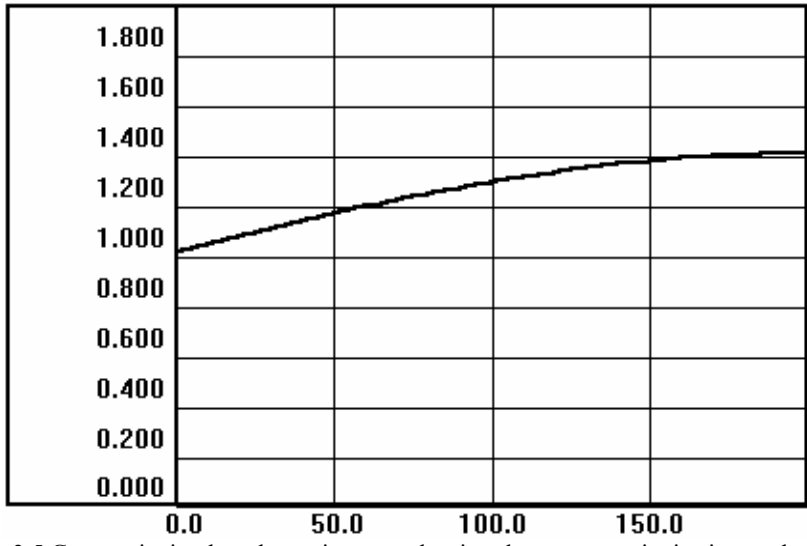


Fig. 3.5 Geometrie tip plan; determinare cu algoritmul ptr. geometrie tip sistem planetar

În Fig. 3.4 raza se măsoară din centru (față de axa de rotație plan) iar în Fig. 3.5 raza se măsoară de la margine spre centru. Se observă o foarte bună concordanță între cele două determinări.

3.3. Cupolă sferică

Geometria cu cupolă sferică este reprezentată în Fig. 3.6 unde R este raza cupolei sferice. În cazul în care sursa plană se găsește la distanța de $2R$ față de vârful

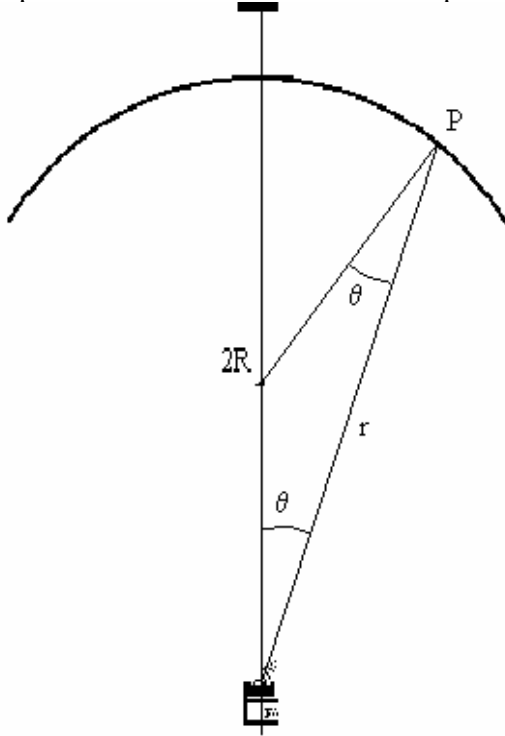


Fig. 3.6. Geometria sferică.

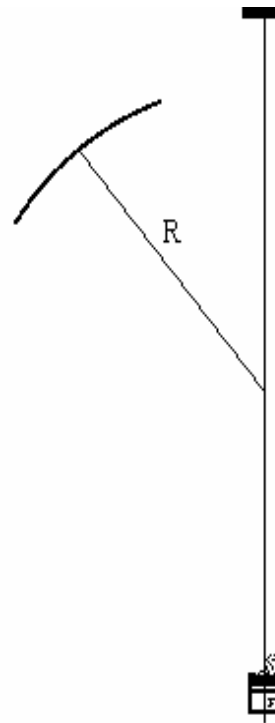


Fig. 3.7 Geometrie tip planetar

cupolei, iar $A=0$, pe cupola sferică se obține o grosime constantă (uniformă). Grosimea care se obține în punctul P este:

$$g_p = \frac{m \cos^2 \theta}{\pi \rho r^2} = \frac{m \cos^2 \theta}{\pi \rho (2R \cos \theta)^2} = \frac{m}{4\pi \rho R^2} = \text{const}$$

Considerăm o geometrie de tip planetar, derivată din cea sferică, reprezentată în Fig. 3.7, în care suprafața pe care se depune are aceeași rază R , iar pe parcursul mișcării de tip planetar, suprafața sferică în cazul sistemului planetar, aparține totdeauna suprafeței sferice din geometria tip cupolă sferică. În acest caz, pe suprafața sferică trebuie să se obțină o grosime constantă. Algorimul satisface acest test.

3.4 Cupola piramidală și conică.

Cupolele piramidale sunt frecvent folosite deoarece permit introducerea de piese de forme diferite în același ciclu tehnologic. În Ref. [4] este studiat uniformitatea straturilor subțiri în geometria tip cupolă conică și de asemenea problema realizării de ecrane, fixe și mobile, pentru creșterea uniformității în aceste geometrii. Luând ca exemplu geometria din Ref. [4], reprezentată în Fig. 3.8, s-a verificat dacă algoritmul dezvoltat dă aceleași rezultate. Uniformitatea este reprezentată în Fig. 3.9 pentru mai multe înclinări ale suprafeței conice. Rezultatele obținute coincid cu cele prezentate în Ref. [4].

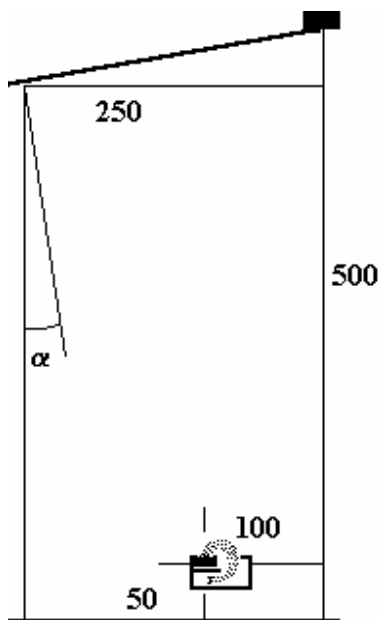


Fig. 3.8. Geometrie tip cupola conica

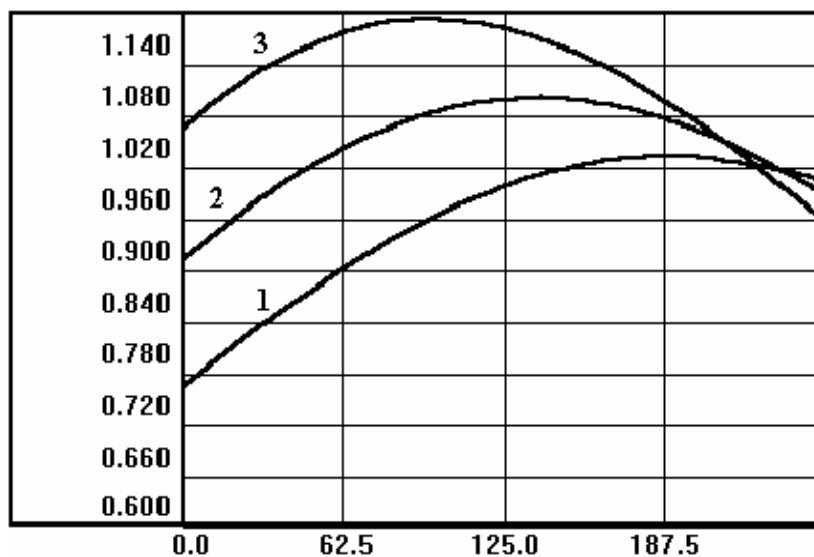


Fig. 3.9 Uniformitatea pentru geometria tip cupola conica: 1 - $\alpha=10$; 1 - $\alpha=20$; 1 - $\alpha=30$;

Presupunem geometria de la instalația BAK 550, reprezentată în Fig. 3.10

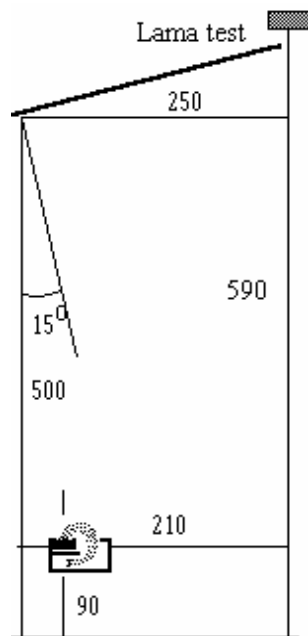


Fig. 3.10. Geometria tip cupolă sferică pentru instalația BAK 550.

Uniformitatea obținută în această geometrie este reprezentată în Fig. 3.11. S-a determinat uniformitatea obținută experimental, aceasta fiind în foarte bună concordanță cu cea teoretică. Uniformitatea s-a determinat realizând straturi subțiri

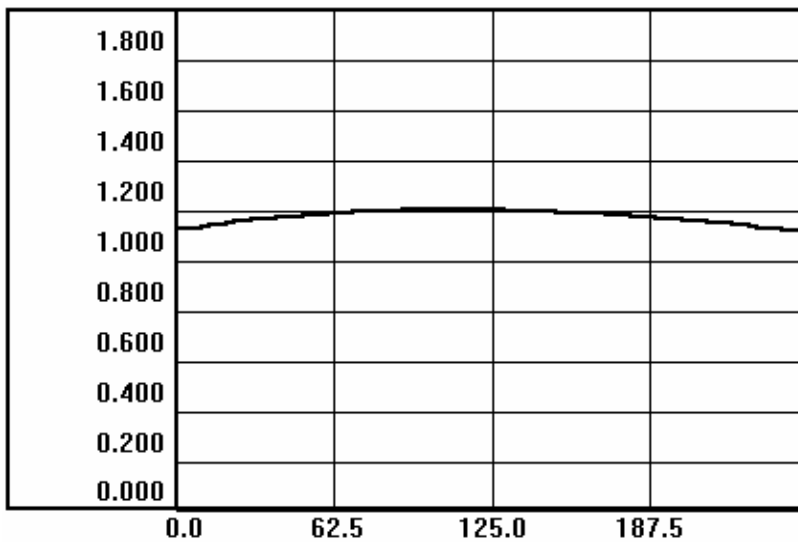


Fig. 3.11. Uniformitate geometrie BAK 550.

din TiO_2 . Realizând straturi din SiO_2 s-a constatat o diferență între datele teoretice și cele experimentale aceasta deoarece distribuția polară a intensității fascicolului evaporat, pentru creuzetul cu bioxid de siliciu, are abateri față de sursa plană, care este considerată în algoritmul de calcul. În cazul evaporării cu fascicul de electroni distribuția polară a intensității fascicolului evaporat poate fi descrisă prin $\cos^n \Phi$, unde n variază între 1.0 și 3.0, funcție de puterea fascicolului de electroni^[5]. Pentru $n=0$ avem cazul sursei punctiforme iar pentru $n=1$ avem cazul sursei plane.

3.5 Geometrie tip sistem planetar.

În cazul în care axa de revoluție coincide cu axa de simetrie a cuadrice atunci neuniformitatea este simetrică față de axa de simetrie a cuadrice. Toate punctele aparținând intersecției dintre un plan perpendicular la axa de simetrie a cuadrice și cuadrică (punctele de pe paralelă) trebuie să aibă același coeficient geometric. Reprezentând coeficienții geometrici pentru punctele din planul meridian, graficul trebuie să fie simetric față de vârful cuadrice. În Fig 3.12. este reprezentată o geometrie de tip planetar în care cuadrică are ecuația:

$$z^2 = -0.64x^2 + 128x \quad (3.41)$$

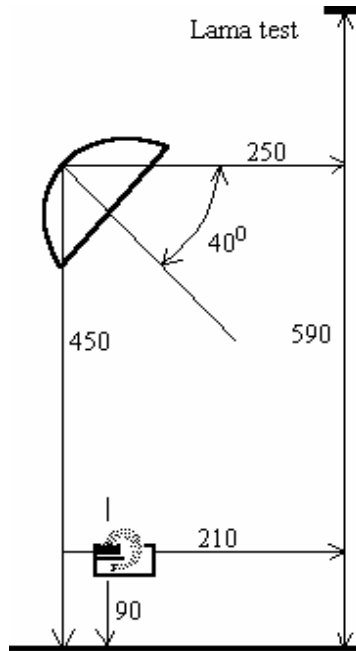


Fig. 3.12. Geometrie tip sistem planetar

Toate înălțimile sunt date față de baza incintei tehnologice. Alegând domeniul de integrare de 1800° (5 rotații) cu pasul $\Delta\varphi = 0.5^\circ$ și raportul vitezelor de $k=2.333$ obținem uniformitatea reprezentată în Fig. 3.13.

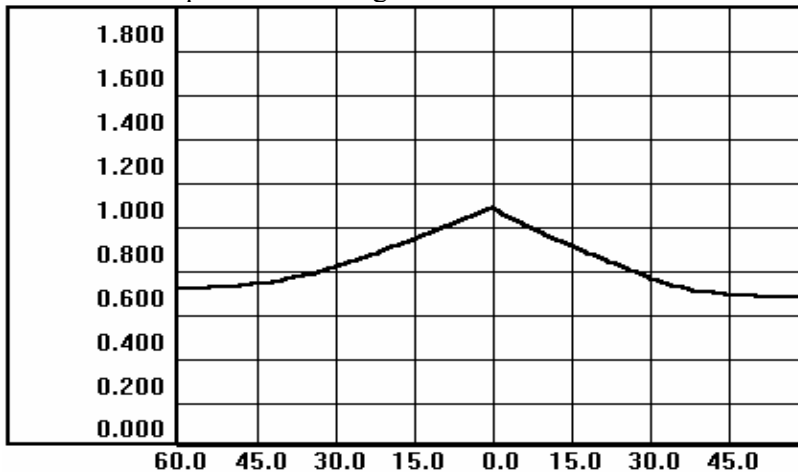


Fig. 3.13. Uniformitate obținută ptr. geometria din Fig. 3.12

Se observă că graficul are mici abateri de la simetrie la valorile mari ale săgeții. Dacă graficul nu este simetric atunci s-au ales gresit pașii de integrare, domeniul de integrare și raportul vitezelor. Teoretic, raportul dintre viteza de revoluție și rotație trebuie să fie un număr irațional pentru a asigura ca pentru domeniul și pasul de integrare aleși, toate punctele de pe paralelă să își piardă identitatea (au același parcurs). În cazul de față, dacă mărim domeniul de integrare la 5400° (15 rotații), obținem uniformitatea din Fig. 3.14.

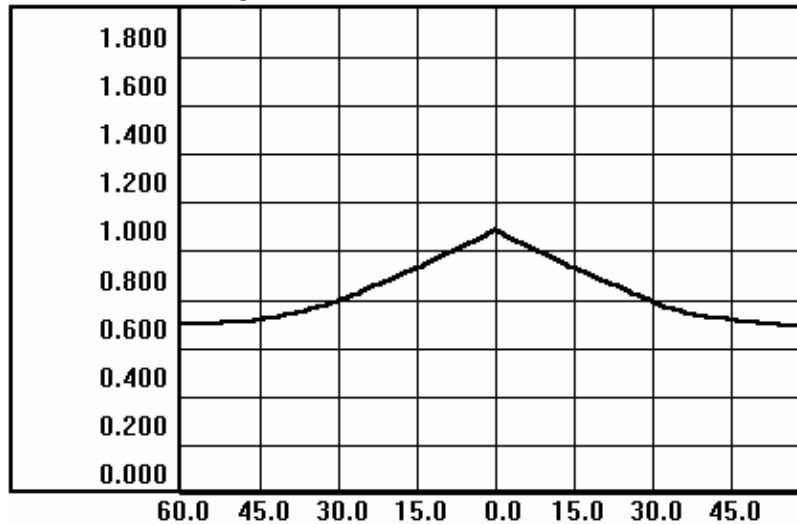


Fig. 3.14. Uniformitate obținută ptr. geometria din Fig. 3.12 cu parametrii de integrare aleși corect.

În cazul în care excentricitatea $e > 0$, punctele de pe paralelă care conțin punctul **P** nu mai au aceeași uniformitate. În acest caz trebuie studiată uniformitatea atât în lungul meridianelor cât și pe paralele. Considerăm geometria din Fig. 3.15, ecuația cuadrice fiind dată de relația (3.41.).

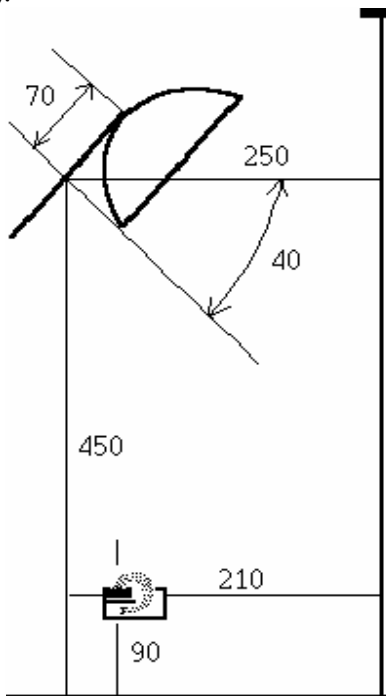


Fig. 3.15 Geometrie de tip planetar cu piesa excentric ($e = 70\text{mm}$).

În Fig. 3.16 este reprezentată uniformitatea pe meridian iar în Fig 3.17 uniformitatea pe paralelă. La evaluarea uniformității pe paralelă se verifică totdeauna dacă domeniul și pasul de integrare sunt corect aleși (se verifică pentru excentricitate $e=0$). Așa după cum se observă, pentru

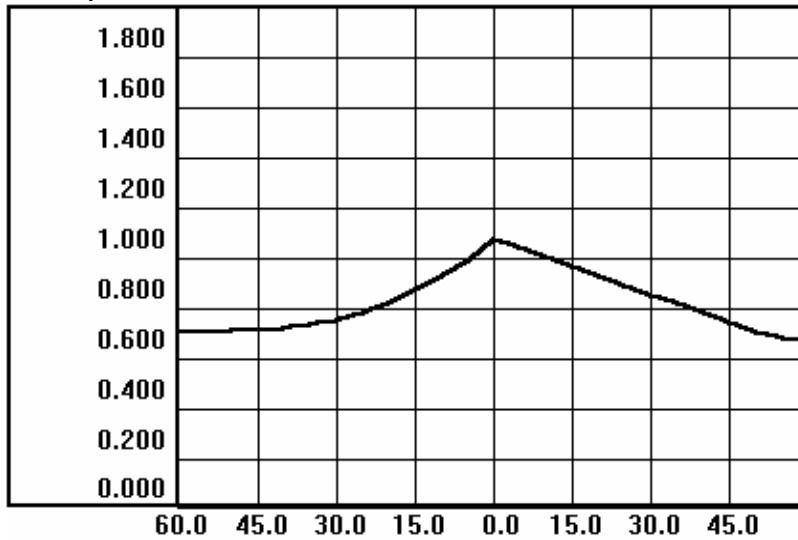


Fig. 3.16 Uniformitatea pe meridian ptr. geometria din Fig.3.15

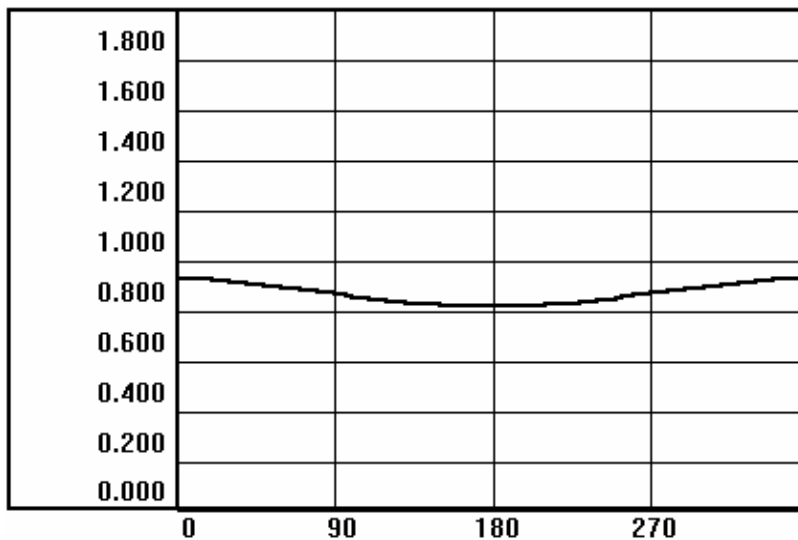


Fig. 3.17. Uniformitatea pe paralela ptr. geometria din Fig.3.15; sageata $s=20$ mm.

uniformitatea pe meridian nu avem același coeficient geometric la marginile cuadrice (ptr. punctele cu aceeași sagemă) iar pentru o paralelă corespunzător săgeții $s=20$ mm, punctele de pe paralelă nu au aceeași uniformitate.

Folosind geometria de tip sistem planetar se poate determina uniformitatea acoperirii pe suprafețele pieselor așezate pe cupole tip plan, sferic și piramidal. Pentru aceasta trebuie determinate coordonatele vârfului suprafeței și unghiul axei de simetrie a suprafeței (axa de simetrie și axa de rotație sunt în același plan). Pentru determinarea uniformității se ia raportul vitezelor $k = 0$ iar domeniul de integrare este de la 0 la 360° . Să presupunem că dorim să realizăm o acoperire pe o suprafață sferică convexă, cu $R=62$ mm, diametrul de 90mm, pe o cupolă piramidală înclinată față de

verticală cu unghiul α (vezi Fig. 3.18). In Fig 3.19 sunt reprezentate uniformitațile pentru trei înclinări ale feței piramidei.

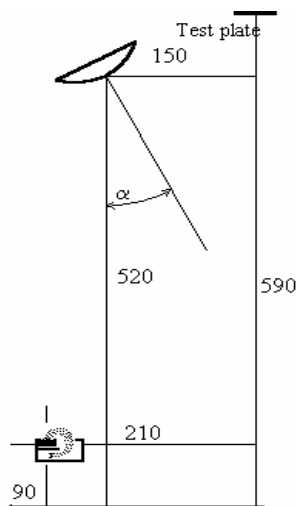


Fig.3.18 Geometria de evaporare tip cupolă piramidală

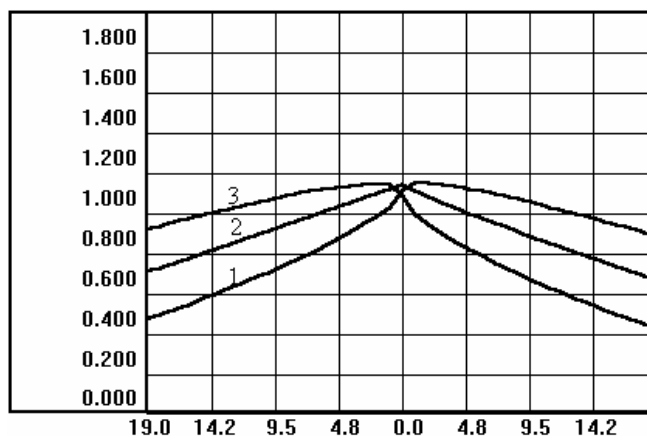


Fig. 3.19 Distribuția coeficientului geometric pe suprafața sferică $R=62\text{mm}$;
1- $\alpha=0^\circ$; 2- $\alpha=15^\circ$; 3- $\alpha=30^\circ$;

In Fig. 3.19. pe abscisă avem săgeata punctului pentru care s-a determinat uniformitatea. Se face observația că, de exemplu, în cazul de mai sus, diametrul corespunzător unei săgeți de 4.8mm este $D= 23,91$ iar pentru o săgeată de 9.5mm avem $D= 32,98$, ceea ce semnifică că diametrul nu este liniar cu săgeata. Uniformitațile obținute cu ajutorul funcțiilor software bazate pe considerentele de mai sus sunt folosite în programul WINOPTIC V1.0 la determinarea comportării spectrale a acoperirilor optice în sisteme optice.

3.6 Ecrane de uniformitate

Geometriile de evaporare care pot fi realizate într-o instalație de evaporare sunt limitate de parametrii constructivi ai instalației. Chiar pentru unele geometrii de evaporare optimizate, uniformitatea rezultată nu este totdeauna satisfăcătoare. Să luăm de exemplu cazul geometriei de evaporare pe suport plan, de tipul celei reprezentate în Fig. 3.3. Grosimea geometrică a stratului într-un punct situat la distanța r față de axa de rotație rezultă din^[1]:

$$g = \frac{mh^2}{2\rho\pi^2} \int_0^\pi \frac{2d\phi}{\left(h^2 + (r+A)^2 - 4rA \sin^2 \frac{\phi}{2}\right)^2} \quad (3.42)$$

Pentru o geometrie dată există un punct cu grosimea geometrică minimă, realizat prin rotirea punctului cu 180° (punctul vede sursa pe toată durata rotirii). Cum celelalte puncte au grosimi mai mari, rezultă că pentru a atinge aceeași grosime minimă, punctele trebuie rotite cu mai puțin de 180° sau, pe durata rotirii cu 180° punctele nu văd sursa tot timpul. Acest lucru se realizează prin interpunerea între sursă și plan a unui ecran, cu o formă determinată, astfel încât să avem o grosime constantă pe plan. Planul ecranului de uniformitate este paralel cu planul (e_1, O, e_2) . În Fig. 3.20. este reprezentată geometria de evaporare văzută perpendicular pe plan.

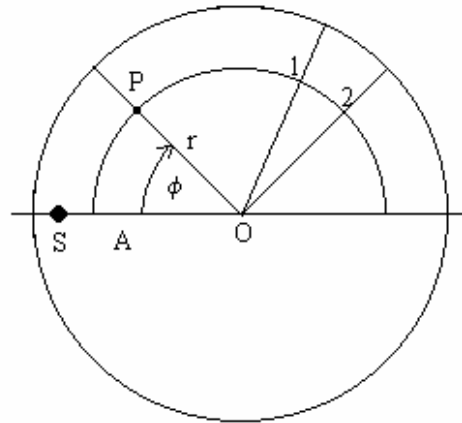


Fig. 3.20. Ilustrarea notațiilor

unde S este sursa plană elementară, la distanța A față de axa de rotație. Notând cu g_{\min} grosimea minimă care se obține pe plan rezultă că, pentru fiecare punct P , avem o grosime în plus $\Delta g = g - g_{\min}$. Dacă ecranul obturator începe din poziția 1, definită de unghiul ϕ_1 , atunci dimensiunea ecranului măsurat pe raza r (văzută de punctul P) este dată de poziția 2 (unghiul ϕ_2) unde trebuie să avem îndeplinită condiția:

$$\Delta g = \frac{mh^2}{2\rho\pi^2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{2d\phi}{\left(h^2 + (r+A)^2 - 4rA \sin^2 \frac{\phi}{2}\right)^2} \quad (3.43)$$

În acest caz, forma ecranului nu este simetrică. Dacă se dorește ca ecranul să fie simetric în jurul poziției 1 atunci ecranul va începe la $\phi_1 - \phi_2$ și se termină la $\phi_1 + \phi_2$ având îndeplinită condiția:

$$\Delta g = \frac{mh^2}{2\rho\pi^2} \int_{\phi_1-\phi_2}^{\phi_1+\phi_2} \frac{2d\phi}{\left(h^2 + (r+A)^2 - 4rA \sin^2 \frac{\phi}{2}\right)^2} \quad (3.44)$$

În cazul ecranelor simetrice constatăm că dacă dreapta poziționată de ϕ_1 este bisectoarea unghiului definit de două surse elementare atunci ecranul de uniformitate este valabil pentru ambele surse elementare. Relațiile (3.43) și (3.44) se folosesc pentru determinarea unghiului ϕ_2 . Dacă ecranul depășește intervalul $[0, \pi]$ atunci în realitate (3.42) domeniul de integrare este de la 0 la 2π . În general, ecranul de uniformitate se pune opus față de sursa elementară deoarece în acea zonă rata de evaporare este mai mică și erorile de poziționare sau de execuție ale ecranului nu conduc la neuniformități semnificative.

Aceleași raționamente pot fi făcute și pentru geometriile tip cupolă sferică și cupolă piramidală^[4]. Să presupunem că dorim să proiectăm un ecran pentru creșterea uniformității straturilor în geometria reprezentată în Fig.3.21 (geometrie de tip cupolă piramidală). Uniformitatea pentru această geometrie este reprezentată în Fig. 3.22. Pentru a se asigura uniformitatea tratării tuturor geometriilor, ecranul obturator (de uniformitate) este considerat paralel cu planul $(\mathbf{e}_1, \mathbf{O}, \mathbf{e}_2)$ urmând ca acesta să fie particularizat pentru geometria particulară. Ecranul este la înălțimea de 490mm simetric. Se calculează în pozițiile de deasupra și opus sursei de vapori (creuzetului), impunându-se coeficientul geometric 1. Formele ecranelor sunt reprezentate în Fig. 3.23 și Fig. 3.24.

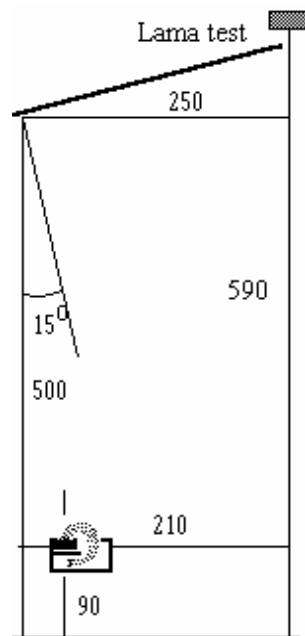


Fig. 3.21 Geometrie tip cupolă piramidală

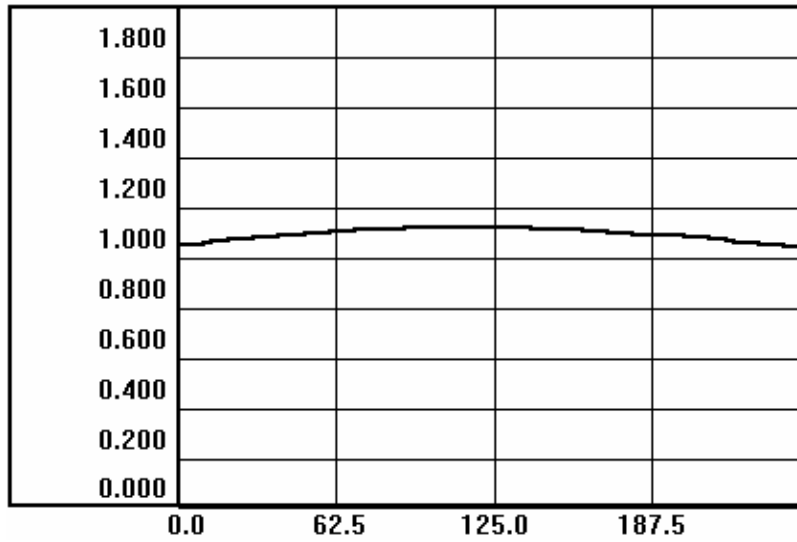


Fig. 3.22. Uniformitatea pentru geometria din Fig. 3.21.

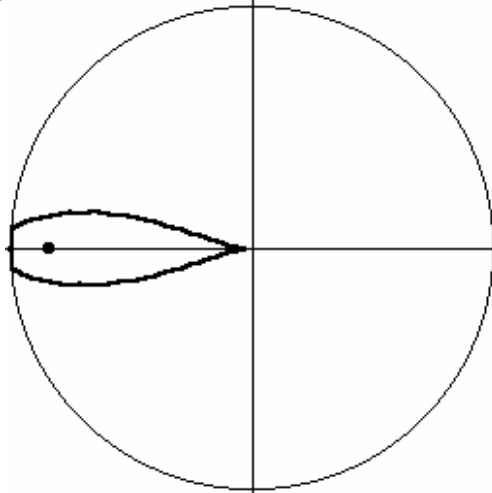


Fig. 3.23 Forma ecranului de uniformitate pentru obținerea lui $c=1$, geometria din Fig 3.21;
Ecranul poziționat deasupra sursei.

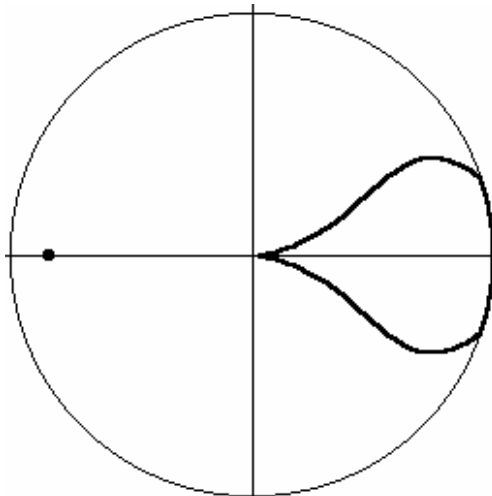


Fig. 3.24 Forma ecranului de uniformitate pentru obținerea lui $c=1$, geometria din Fig 3.21;
Ecranul poziționat opus sursei.

Pentru cazul geometriei tip sistem planetar se pot folosi ecrane obturatoare de forma sector de cerc de care se ține seama în algoritmul de determinare a uniformității. Ecranele de uniformitate nu mai pot fi determinate ca pentru celelalte geometrii de evaporare deoarece punctul **P** nu are totdeauna același parcurs în dreptul ecranului. De aceea parametrii ecranului sunt dați de către utilizator. Ecranele au forma reprezentată în Fig. 3.25.

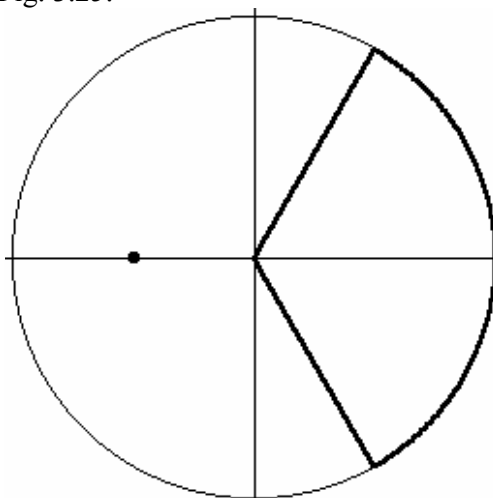


Fig. 3.25. Forma ecran obturator pentru sistem planetar.

Să presupunem că avem geometria de tip planetar ca cea reprezentată în Fig. 3.12. Constatăm că grosimea maximă se obține în vârful cadriceii iar grosimea minimă la margine. Pentru a crește uniformitatea, logic este să obturăm punctul **P** în zonele în care rata de evaporare este mare în vârful cadriceii și mică la marginea cadriceii. Această zonă este cea opusă sursei. În Fig. 3.26 sunt reprezentate uniformitățile pentru trei ecrane simetrice, poziționate la $\phi=180^\circ$ de deschideri 120° , 200° și 280° și înălțimea de 350mm.

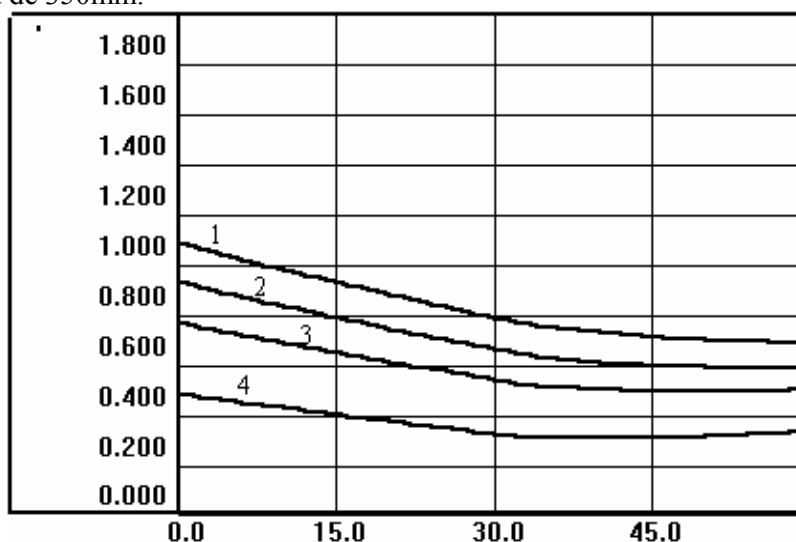


Fig. 3.26 Uniformitatea ptr. geometria din Fig. 3.12. 1- fără ecran; 2 – 120° ; 3 – 200° ; 4 - 280°

Se observă că pentru deschideri unghiulare mari ale ecranului, uniformitatea crește însă scade mult coeficientul geometric, ceea ce conduce la un consum mare de

material evaporat și, în special, face ca, la controlul fotometric al acoperirii optice în procesul tehnologic, să se folosească filtre interferențiale de măsură cu mult în afara domeniului spectral de lucru al acoperirii.

În cazul în care suprafața pe care se depune este cea convexă, parametrii geometriei de tip planetar trebuie aleși cu atenție, ținându-se seama de faptul că vaporii de material pot fi incidenți pe suprafață la unghiuri mari ceea ce face ca straturile să fie poroase și cu rezistență mecanică scăzută.

Atunci când suprafața pe care se depune are dimensiuni mari, este posibil ca, pe durata mișcării de tip planetar, distanța dintre sursa de vapori și unele puncte **P** de pe suprafața să fie mică, fapt ce conduce la rate de evaporare mari care pot crea probleme privind proprietățile straturilor subțiri. Se urmărește ca pe toată durata mișcării de tip planetar, pe fiecare punct de pe suprafață, să nu avem rate de evaporare mai mari de o anumită valoare impusă de cerința obținerii unor straturi subțiri cu proprietăți optice și mecanice dorite.

Ecranele de uniformitate pot fi folosite și pentru obținerea unei neuniformități impuse.

Referinte:

1. L. Holland, *Vacuum Deposition of Thin Films*, Chapman & Hall Ltd. London, 1960.
2. Honciuc Gh., Gaceff St., Georgescu C, "Determinarea distribuției grosimii straturilor subțiri pe suprafețe asferice care descriu o mișcare de tip planetar", Congresul Național de Optica, București, 1984
3. V. Cruceanu, *Elemente de algebra liniară și geometrie*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1973
4. R. P. Netterfield, "Uniform evaporated coatings on rotating conical workholders", *J. Vac. Sci. Technol.*, **19** (2), Jul./Aug. 1981.
5. Cheng-Chung Lee și alții, "Making aspherical mirrors by thin-film deposition", *Appl. Opt.* 32 (28) 5535-5540 (1995).