

Cap.6. TUBURI ELECTRONICE. TUBUL CATODIC

6.1. Introducere

Tubul electronic a fost primul element activ (amplificator) in electronica. Cu toate ca sunt demodate pentru majoritatea amplificatoarelor miniaturizate, tuburile si-au găsit locul unde trebuie manipulate tensiuni înalte sau unde sunt implicate semnale de putere mare si înalta frecventa (in emitatoarele radio). Suplimentar acestor aplicații specializate, tuburile electronice au fost utilizate extensiv in echipamentele electronice pana prin anii 1960. Este util pentru inginerul electronist sa aibă unele cunostinte elementare legate de tuburile electronice si montajele in care acestea sunt implicate. Acest capitol da o scurta descriere a circuitelor cu tuburi electronice, incluzând descrierea unui dispozitiv termoelectronic care este inca extensiv utilizat: tubul catodic.

6.2. Emisia termoelectronică

Inca din anul 1883, Thomas Edison, a studiat si construit o lampa cu filament de carbon, atrăgându-i atenția înnegrirea tubului de sticla după câteva ore de funcționare. Cu intenția de a capta unele din particulele care înnegreau sticla, a introdus in balonul de sticla o placa metalica si a fost surprins sa descopere ca daca făcea placa pozitiva in raport cu filamentul, in circuit apărea un curent. Timp de douăzeci de ani nimeni nu a știut ca acest efect numit "**efect Edison**", era datorat electronilor emiși de filamentul cald si captați de anodul (placa) încărcat pozitiv. Termenul de "**emisie termoionica**" (**emisie termoelectronică**) a fost desemnat sa descrie aceasta eliberare activata termic de particule "ioni termici" (electroni). Cu toate ca acum cuvântul ion înseamnă un atom care a pierdut sau a primit un electron, semnificația sa originala era mult mai larga, însemnând pur si simplu o particula libera sa calatoreasca.

6.3. Dioda (termoelectronică)

Înnegrirea lămpii a fost studiata si de Ambrose Fleming, cam in același timp când Edison lucra in acest domeniu, si care a dus studiul intr-o etapa superioara cercetând realizarea unui detector evoluat pentru undele radio ale lui Marconi. In 1904 el si-a patentat "tubul oscilator", numit astfel pentru ca permitea trecerea curentului intr-o singura direcție.

Fig.6.1(a) prezintă construcția unui tub cu doi electrozi "dioda", denumire pe care invenția lui Fleming începe sa o poarte. Filamentul incandescent este înconjurat de o placa cilindrica, numita "anod" (deoarece acesta este menținut pozitiv in raport cu filamentul). In mod similar filamentul este numit uzual "catod". Simbolul de circuit pentru dioda este prezentat in fig. 6.1(b), filamentul si anodul (placa) fiind clar reprezentați. Caracteristica curent-tensiune a diodei (termoelectronică) este prezentata in fig.6.1(c) (se constata o mare asemănare cu caracteristica joncțiunii semiconductoare).

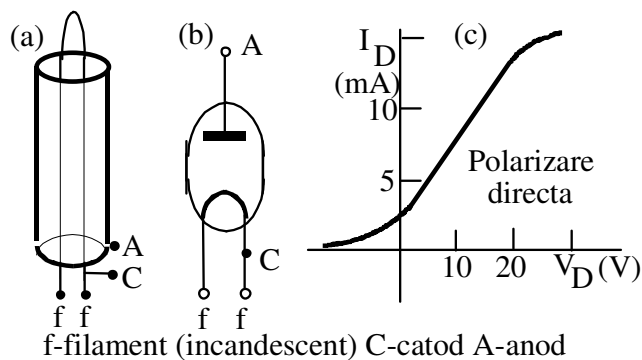


Fig.6.1. Dioda: (a)-construcție (b)-simbol (c) caracteristica curent-tensiune

In dioda termoelectronică, spre deosebire de joncțiunea semiconductoare, apare un mic curent direct chiar la tensiune zero pe dispozitiv. Explicația este ca electronii sunt emiși de filament cu o anumita viteză, câștigata prin ciocniri cu atomii care au o agitație violenta datorata temperaturii. O parte mica din acești electroni ating anodul chiar in lipsa unui câmp aplicat.

Daca anodul este făcut ușor pozitiv, mai mulți electroni sunt atrași spre acesta. Nu toți electronii emiși ating anodul; apare astfel un larg nor de electroni între catod si anod ca o "sarcina spațiala negativa" care are un efect de respingere pentru electronii emiși. Acest efect de inhibare al sarcinii spațiale poate fi asemănat cu cel al zonei de sărăcire intr-o joncțiune

semiconductoare. Daca potențialul pozitiv al anodului crește, efectul sarcinii spațiale este depășit și tot mai mulți electroni ating anodul.

Daca anodul este făcut negativ în raport cu filamentul, electronii emiși sunt respinși înapoi spre catod și nu mai avem un curent între catod și anod, chiar dacă tensiunea negativă de pe anod crește. Trebuie notat că dacă vidul din interiorul diodei este înalt, nu avem "purători minoritari" care să producă un curent de fugă (pierderi) invers. Curenții inverși reziduali pentru diodele electronice sunt extrem de mici (fata de curenții reziduali de la diodele semiconductoare).

6.4. Trioda

Pentru a realiza un dispozitiv termoelectronic amplificator, trebuie adăugați diodei o serie de electrozi suplimentari, astfel curentul anodic să poată fi controlat prin potențialul de pe acești electrozi. Acest lucru a fost făcut pentru prima dată de Lee de Forest în 1907, care a construit un tub electronic cu o grilă (rețea) metalică între catod și anod. Acest dispozitiv cu trei electrozi, numit "trioda" este prezentat în fig.6.2(a) ca reprezentare simbolică iar în fig.6.2(b) se prezintă o caracteristică de transfer pentru o trioda de mică putere. Grila este menținută, în mod normal, la un potențial negativ în raport cu filamentul (catodul). În aceste condiții ea respinge spre catod pe unii din electroni, permițând doar unora să treacă prin "spațiile din grilă" spre anod. Mărind negativitatea grilei, ea va respinge mai mulți electroni spre catod, conducând astfel implicit la micșorarea curentului anodic. Există o tensiune de grilă la care curentul anodic "cade" la zero, toți electronii fiind întorși din drum. Comportamentul este similar cu al FET-ului; atât FET-ul cât și TRIODA produc un curent de ieșire controlat de tensiunea de intrare (caracteristica de transfer pentru trioda este prezentată în fig.6.2(b)). La fel ca la FET, proprietățile de transfer sunt specificate prin transconductanța g_m , unde:

$$g_m = \frac{\text{variația curentului anodic}}{\text{variația tensiunii de grilă}} = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g} \text{ (uzual mA/V)}$$

Transconductanța este uneori impropriu numită "conductanța mutuală", de unde provine și notația g_m extinsă și la FET-uri.

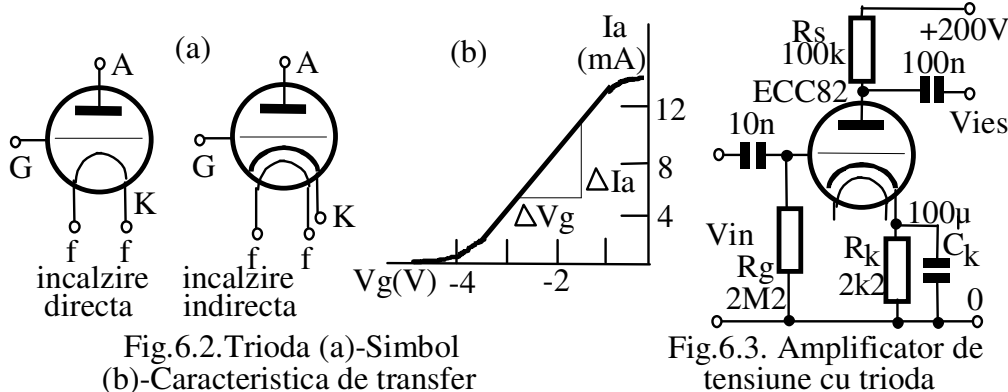
6.5. Realizarea catodilor

Primele tuburi electronice foloseau filamente de tungsten. Era necesară o temperatură a filamentului de 2300°K pentru a obține o emisie de electroni corespunzătoare; aceste tuburi foloseau o putere considerabilă pentru încălzirea filamentului și aveau o viață relativ scurtă. S-a descoperit că un filament acoperit cu oxizi de bariu și stronțiu are o emisie foarte bună, încălzit la o temperatură de doar 1000°K. Astfel acest catod acoperit cu oxizi a devenit catodul standard, excepție făcând doar catodii pentru tuburile de foarte mare putere.

Primele echipamente cu tuburi foloseau curent continuu atât pentru alimentarea anodului (H.T.- înalta tensiune), cât și pentru alimentarea filamentului (L.T.- joasă tensiune). Este însă mult mai convenabil de alimentat filamentele cu tensiune alternativă (a.c.), ușor de obținut cu ajutorul transformatoarelor de rețea. Sunt însă două probleme care apar datorită alimentării în curent alternativ a filamentului (catodului). În primul rând temperatura filamentului poate fluctua cu o frecvență de 100Hz (frecvența curentului alternativ de la rețea fiind 50Hz). În al doilea rând, întrucât tensiunea de intrare se aplică între grilă și catod, o porțiune a tensiunii a.c. de filament va apărea în semnalul de la intrare, producând o componentă de "brum" cu frecvența de 50 Hz.

Aceste două probleme sunt înlăturate folosind în locul unui simplu filament un nou tip de catod "cu încălzire indirectă", catod generalizat la majoritatea tuburilor electronice de mică putere. După cum sugerează și numele, catodul este izolat față de filament, astfel se împiedică pătrunderea componentei alternative de 50Hz în semnalul de intrare. Încălzirea se face cu un filament de tungsten acoperit cu un material izolator refractar, introdus într-un cilindru de nichel care este acoperit cu oxizii de stronțiu și bariu care formează "catodul cu încălzire indirectă". Aceasta structură are o

capacitate termica mult mai mare ca un simplu filament si astfel este diminuată fluctuația termica a catodului, fluctuație care ar modula numărul de electroni emiși de acesta.



Un dezavantaj al acestei capacitati termice ridicate este faptul ca acest catod cere un timp de 20...30 sec. ca sa atingă temperatura optima de funcționare.

6.6. Amplificator de tensiune cu trioda

Trioda poate fi folosita intr-un circuit amplificator de tensiune similar ca structura cu cele pentru tranzistoarele FET; fig.6.3 prezintă schema unui amplificator cu trioda.

Ca si in cazul altor amplificatoare de tensiune, tensiunea de ieșire este dezvoltata pe rezistenta de sarcina R_S . Rezistenta din catod are un rol similar ca si rezistenta din sursa la un FET, realizând polarizarea automata a grilei. Condensatorul $C_K=100\mu F$ care decuplează rezistenta R_K si astfel previne apariția semnalelor a.c. in catod, lucru care ar conduce la o puternica reducere de amplificare, aducând la intrare (pe grila) un semnal in opoziție de faza fata de semnalul util (reacție negativa).

La fel ca FET-ul, tubul electronic este un dispozitiv controlat in tensiune si care are un curent neglijabil de intrare (o impedanța mare deci de intrare). Este un dezavantaj faptul ca necesita o tensiune înalta de alimentare (+200V), dar acest lucru permite la ieșire semnale de amplitudine mare înainte de a apare unele limitări (la semnale mari apar distorsiuni). Circuitul prezentat (fig.6.3) poate produce semnale de ieșire de aproximativ 100V (vârf la vârf) înainte sa apară distorsiuni serioase, la o amplificarea tipica de tensiune de 30.

6.7. Tetroda si pentoda

Când trioda a devenit extensiv utilizata pentru amplificare in domeniul undelor radio (anul 1920), s-a constatat rapid ca performantele ei se diminuează la frecvente înalte (cativa zeci de kiloherti). La aceste frecvente câștigul scade rapid si unele amplificatoare vor oscila, generând semnale parazite ele insisi. Problemele vizând amplificarea la frecvente înalte sunt deosebit de complexe, atât in cazul tuburilor electronice cât si al tranzistoarelor. Cauza deficientelor triodei la frecvente înalte este capacitatea dintre anod si grila. Pentru a surmonta aceste deficiente, o a doua grila s-a montat intre prima grila si anod. Aceasta a doua grila, sau grila ecran, are rolul unui ecran electrostatic intre anod si grila de comanda. Aceasta este menținuta la un potențial d.c. pozitiv, similar cu cel al anodului in sensul menținerii fluxului de electroni, dar este conectata la masa (pământ) printr-un condensator, astfel ca in ceea ce privește semnalele a.c. ea este ca un ecran impamântat. In acest fel Schottky a realizat in 1919 tubul numit "tetroda", a căru simbol este prezentat in fig.6.4(a).

Când electronii lovesc anodul ei pot disloca alți electroni si produc ceea ce se numește "emisie secundara". Un dezavantaj al tetrodelor este ca acești electroni secundari pot fi captați de grila ecran si astfel "fura" din curentul anodic, dând naștere la o alura nedorita (cădere) in caracteristica curentului anodic. O cale de surmontare a acestei situații este de a dirija electronii in

mișcarea lor spre anod sub forma unui fascicol concentrat, folosind pentru aceasta plăci speciale de concentrare și dirijare. În acest fel se creează o sarcină spațială negativă densă care va respinge electronii (secundari) înapoi în anod. Acest tip de tuburi electronice se numesc "tetrode cu fascicol dirijat" și au fost utilizate extensiv în etajul de ieșire al amplificatoarelor audio de putere (ex. KT88, 6L6, 6Π3, etc.).

A doua soluție, pentru a scăpa de emisia secundară, este să introducem încă o grilă ("grila supresoare") între "grila ecran" și "anod". Grila supresoare este legată ori la catod (de obicei intern), ori la pământ (masă), astfel încât ea respinge electronii secundari, lăsând însă electronii, cu energii mari, din fascicolul grilei ecran să treacă spre anod. Acest tub electronic cu cinci electrozi se numește "pentoda" (Tellegen, 1928), și simbolul său este prezentat în fig.6.4(b).

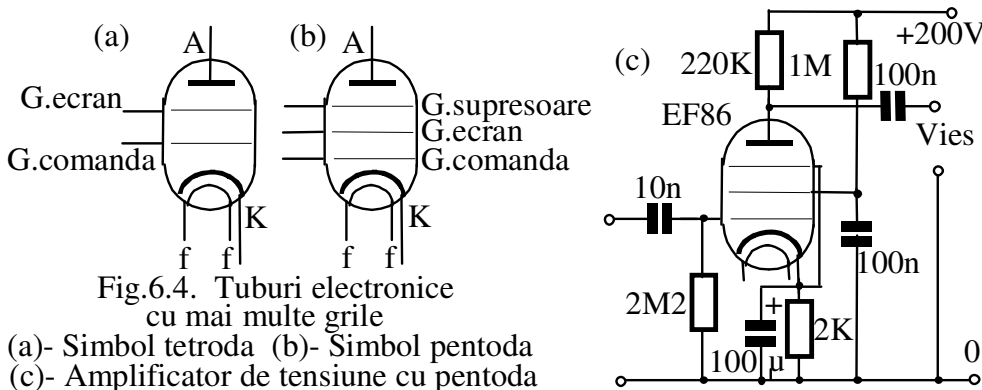


Fig.6.4. Tuburi electronice cu mai multe grile

(a)- Simbol tetroda (b)- Simbol pentoda
(c)- Amplificator de tensiune cu pentoda

Cu toate că pentoda a apărut inițial din necesitatea amplificării în domeniul frecvențelor înalte, ea a câștigat o largă aplicație având caracteristici în general mult mai bune decât ale triodei, excepție făcând zgomotul, care este puțin mai mare la pentoda. Pentoda a fost astfel larg utilizată atât în amplificatoarele de joasă frecvență cât și în cele de înaltă frecvență. Este util de remarcat că chiar dacă trioda și FET-ul au proprietatea de a fi dispozitive cu trei electrozi, caracteristicile FET-ului sunt mai apropiate de cele ale pentodei decât de cele ale triodei.

În fig.6.4(c) se prezintă un circuit amplificator de tensiune folosind o pentoda de tip "EF86", cu zgomot mic. Acest circuit dă o amplificare de tensiune de aproximativ 300 și este reprezentativ pentru multe circuite care se întâlnesc în echipamentele cu tuburi electronice. Trebuie evidențiată legătura dintre grila supresoare (G_3) și catod (K), legătura grilei ecran (G_2) prin rezistența de 1M la tensiunea de alimentare a anodului ($HT=200V$) și decuplarea sa prin condensatorul de 100nF (acesta conduce semnalul a.c. la masa montajului).

6.8. Tubul catodic: construcție și funcționare

Un dispozitiv termoelectronic care este foarte puțin probabil să devină demodat în viitorul apropiat este **tubul catodic (CRT)**. Tubul catodic este folosit ca dispozitiv de afișare în osciloscop și bineînțeles ca dispozitiv final pentru imagine în sistemele de televiziune (receptoare și monitoare TV).

Tubul catodic este alcătuit din trei elemente de bază: un tun electronic care produce un fascicol intens și focalizat de electroni, un sistem de deflexie a fascicolului de electroni (poate fi electrostatic sau magnetic) și un ecran fluorescent care emite radiații vizibile în punctele de impact cu fascicolul de electroni, datorită stratului de luminofor existent. Fluorescența este o fotoluminescență care încetează practic odată cu excitația care o produce (după o întârziere de $10^{-5} \dots 10^{-8}$ secunde), nedepinzând de temperatura. La ecranele fosforescente fotoluminescența continuă cu o intensitate din ce în ce mai mică și după ce a fost întreruptă excitația. Durata sa (remanentă) depinde de natura materialului (sulfura de calciu, wolfram de bariu, etc.) și de temperatura, putând depăși 1 secundă. Principalele părți constructive ale tubului catodic (CRT) cu deflexie electrostatică sunt prezentate în fig.6.5.

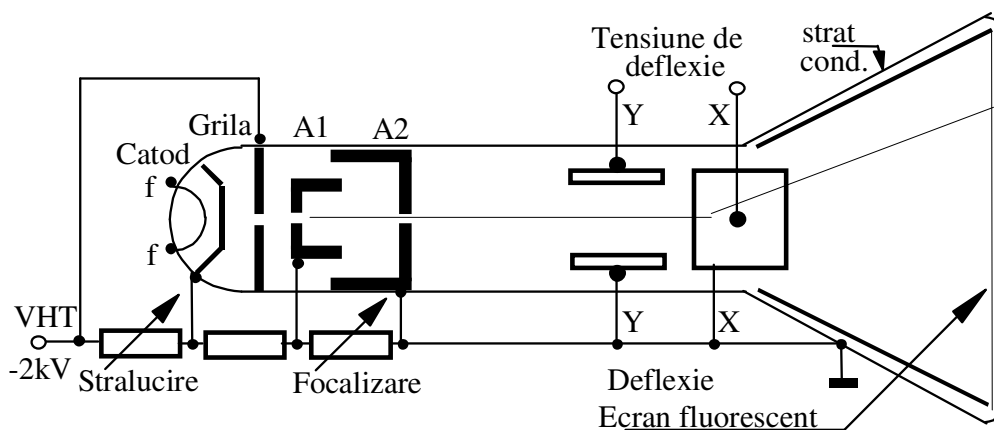


Fig.6.5. Tub catodic cu deflexie electrostatica

Catodul emite electroni care sunt accelerați spre primul anod A1 care este menținut pozitiv, la câteva sute de volți în raport cu catodul. Fluxul de electroni este controlat de grila, a cărei polarizare negativă este reglată de controlul "de strălucire". Fascicolul de electroni trece prin orificiul primului anod și se îndreaptă spre al doilea anod A2, care este ușor mai pozitiv decât primul. Scopul celor doi anodi este de a produce un câmp electric local cu linii de forță curbate astfel ca toți electronii din fascicol vor converge spre același punct de pe ecranul fluorescent. Diferența de potențial dintre A1 și A2 este reglată de unitatea de control a focalizării până când pe ecran apare un spot mic și bine conturat. Această combinație cu doi anodi (A1-A2) poate fi considerată ca o lentilă electrostatică. Se poate aplica în mod similar un câmp magnetic, pentru a avea o lentilă magnetică, procedeu folosit la unele tuburi catodice. Acest gen de "lentile" (electrostatice, electromagnetice) sunt larg folosite în "**microscopia electronică**", unde combinații ale lentilelor electronice permit obținerea unor mărimi foarte mari cu rezoluții apreciabile, ca și în cazul microscopelor optice.

Fascicolul de electroni după ce paraseste zona anozilor de focalizare se îndreaptă spre plăcile de deflexie, pe care se aplică potențiale pentru realizarea deplasării verticale (plăcile Y) sau orizontale (plăcile X) a fascicolului în drumul său spre ecranul fluorescent (fosforescent). Energia fascicolului de electroni este suficient de mare pentru a produce electroni secundari, care sunt expulzați (smulși) din ecran și sunt colectați de stratul conductor care acoperă ecranul și este legat la masa montajului. De fapt există atâtea sarcini pierdute de ecran încât acesta se menține la câțiva volți pozitiv față de ultimul anod (A2).

Emisia secundară este utilizată în tuburile catodice cu memorie (stocare de imagine) care au fost folosite la osciloscopul cu memorie. Aceste tuburi catodice cu memorie (cu remanentă foarte mare) sunt în stare să stocheze o imagine pe ecran pentru o durată de o oră. Această proprietate este folosită pentru examinarea formelor de undă tranzitorii. Stocarea (memorarea) se face acoperind stratul fosforescent cu un strat țintă care este foarte eficient emitor de electroni secundari și de asemenea un foarte bun izolator.

Când fascicolul de electroni trasează o curbă pe ecran, stratul țintă devine pozitiv în punctele atinse de fascicol. Pentru a vizualiza această imagine "stocată" se pornește un al doilea tun electronic. Acest tun produce un fascicol divergent de electroni, inundând ținta cu electroni. Ținta respinge fascicolul de electroni spre ecranul fluorescent în zonele unde aceasta a fost încărcată pozitiv și astfel se evidențiază "curba memorată", aceasta rămâne pe ecran până când sarcina pozitivă este complet neutralizată. În practică, definiția imaginii uzuală rămâne acceptabilă, pentru un interval de circa zece minute.

Cu toate că deflexia electrostatică este un standard în multe osciloscopul, ea nu este folosită la tuburile catodice folosite în receptoarele de televiziune. Aceste tuburi, cu ecrane mari cu diagonala de 60...70 cm, cer o energie mare a fascicolului de electroni pentru a asigura o "strălucire și luminozitate" adecvată, iar corespunzător unghiurilor mari de deflexie cerute (110°, 90°), plăcile de deflexie ar necesita potențiale enorme dacă s-ar utiliza deflexia electrostatică. Deflexia magnetică a

devenit standard pentru acest gen de aplicații. Fig.6.6 prezintă un aranjament tipic pentru deflexie magnetica, unde se folosesc doua bobine pentru a produce câmpul necesar deflexiei. Trebuie amintit ca axele bobinelor sunt perpendiculare pe direcția de deflexie, spre deosebire de cele electrostatice, care sunt paralele cu direcția de deflexie.

O întreaga varietate de materiale fluorescente (fosforescente) sunt folosite in construcția tuburilor catodice. Cel mai eficient din punctul de vedere al strălucirii optice, pentru un curent dat al fascicolului de electroni incident, este verde sau verde-albastru, acestea fiind culorile uzual văzute in cazul tuburilor catodice pentru osciloscopae. Unele materiale au o rapida descreștere a intensitatii luminoase emise la încetarea expunerii la fascicolul electronic (materiale "cu persistenta mica"), in timp ce altele au o "persistenta lunga" (remanenta de ordinul secundelor). Aceste materiale cu "persistenta" (remanenta) sunt folosite pentru examinarea fenomenelor tranzitorii de joasa frecventa si pentru ecranele instalațiilor radar. Unele osciloscopae cu memorie au posibilitatea de a controla "durata persistentei" prin modificarea ratei de descărcare a țintei.

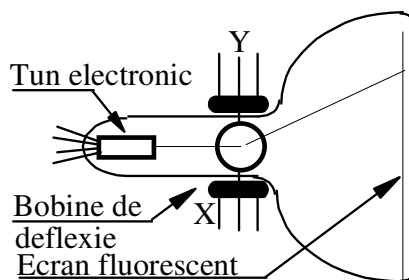


Fig.6.6. Deflexie magnetica pentru un tub cinescop

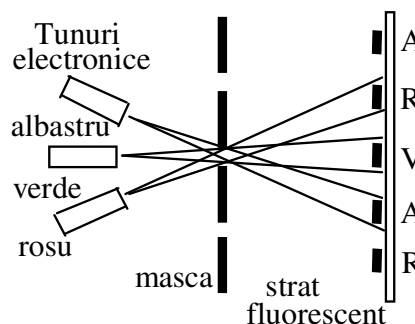


Fig.6.7. Principiul constructiv pentru un cinescop cu mască perforată

Pentru tuburile cinescop alb-negru ale receptoarelor TV se folosesc materiale cu persistenta mica pentru a împiedica "mâzgălirea" (mânjirea) imaginilor in mișcare. Ca luminofori se folosesc sulfuri, selenuri, silicați, wolframati sau fluoruri ale elementelor din coloana a doua a tabelului lui Mendeleev (Zn, Cd, Mg, etc.). La aceste materiale se adaugă pentru activare Ag, Mn, Cu, Cr, s.a.

Pentru realizarea cinescoapelor color se folosesc materiale fluorescente care corespund cât mai apropiat culorilor "primare aditive" RGB (roșu, verde și albastru) care prin combinare vor da toate culorile dorite. In cele mai răspândite tuburi cinescop color, tuburile cu mască perforată (de umbrire - **Shadow Mask**, realizat de firma RCA in 1950), ecranul este acoperit cu grupuri de puncte (3×500.000 granule de luminofori). Fiecare grup este o formație triunghiulara (in delta; nu se mai utilizează) sau in linie (tip PIL - **Precision In-Line**, RCA, 1972), din puncte de material fluorescent roșu, verde și respectiv albastru. Tubul cinescop dispune de trei tunuri electronice independente, unul acoperind punctele roșii, altul cele verzi și al treilea pe cele albastre. Cum ne putem aștepta, este necesara o aranjare extrem de precisa pentru ca fiecare tun electronic să acționeze doar asupra punctelor fluorescente corespunzătoare. Acest lucru este asigurat prin plasarea unei "măști metalice perforate (de umbrire)" cu orificii precise, între tunurile electronice și ecranul fluorescent. In aceasta mască exista câte un singur orificiu pentru fiecare grup (roșu, verde, albastru) de luminofori. Fig.6.7 prezintă schematic imaginea celor trei tunuri și a măștii perforate într-un astfel de tub cinescop. După cum se vede, mască permite tunului "roșu" să expună doar punctele fluorescente "roșii"; la fel și pentru celelalte doua culori. Controlând intensitățile relative ale celor trei tunuri electronice, se poate produce orice culoare oriunde pe ecran.

Dintre tuburile cinescop color (tricolor) se remarcă tipul **trinitron**, creat de firma SONY in 1968. La tuburile **black-trinitron**, ecranul tubului reprezintă o porțiune din suprafața unui cilindru, ceea ce reprezintă un avantaj fata de cele cu mască perforată **in-line**, care au ecranul o porțiune din suprafața unei sfere. Colturile sunt drepte, fara distorsiuni și nu reflecta lumina ambienta. Ecranul negru este mai ușor suportat de ochi, iar contrastul este mai mare.