

2. METODE DE PRODUCERE A FIBRELOR ȘI GHIDURILOR OPTICE DE UNDĂ

2.1. Producerea fibrelor optice

În ultimii treizeci de ani s-au dezvoltat foarte mult dispozitivele optoelectronice active și pasive ghidate datorită posibilităților de miniaturizare a circuitelor și de integrare monolitică pe același substrat a mai multor componente, acestea fiind fabricate prin diferite metode [2.1]-[2.9].

Unul dintre cele mai cunoscute ghiduri optice este *fibra optică*, aceasta având o secțiune circulară și fiind formată dintr-un *miez* și o *cămașă* dispusă la exteriorul miezului. Indicele de refracție al miezului este mai mare decât cel al cămășii. Fibrele optice cel mai des utilizate sunt realizate dintr-un material refractar acid (*silica*) care conține cel puțin 93% SiO_2 , fabricat din cuarțite, cu liant de var sau cu argilă, în general și cu adaosuri mineralizate, arse la $1460 \div 1530$ °C timp de 24 de ore, pentru a transforma o fracțiune cât mai mare din cuarț în trimidit (varietate a SiO_2).

Diametrul miezului este mult mai mare decât lungimea de undă a radiației, fiind cuprins între $5 \div 200$ μm . O valoare standard este de 50 μm cu cămașă de 125 μm . Pentru evitarea pierderilor luminoase parazite în cămașă, se adaugă o cămașă exterioară cu indice de refracție mai mare decât al cămășii interioare.

Spre deosebire de fibra optică, *ghidurile optice de undă*, folosite în circuitele optice integrate au de cele mai multe ori o structură planară cum ar fi de exemplu filmele plane sau panglicile (*strips*).

În general, realizarea *ghidurilor optice de undă* prin diferite metode (difuzie, schimb ionic etc.) se face pe baza unor tehnologii moderne care au în vedere așa-numitele tehnici de fotolitografiere și de difuzie, similare celor utilizate în industria microelectronică.

Toate aceste procese tehnologice trebuie să se desfășoare într-un mediu perfect curat pentru a evita ca eventualele impurități conținute în aer să contamineze și să altereze într-o măsură relevantă structurile realizate. Din această cauză se folosesc așa-numitele *camere curate (albe)* în care cantitatea de impurități este menținută sub un control strict, de exemplu într-un centimetru cub de aer nu trebuie să existe mai mult de 100 particule cu dimensiuni mai mari de 0,5 μm .

Tehnologiile utilizate pentru obținerea materialelor caracterizate printr-o transparență ridicată din care sunt confecționate fibrele optice se împart în două mari grupe: metoda creuzetului sau din fază lichidă și respectiv metoda de depunere din stare de vapori.

2.1.1. Metoda creuzetului

Metoda creuzetului este utilizată în general pentru obținerea fibrelor din sticle care au punct de topire coborât (v. fig. 2. 1). Materialele componente pure aflate în stare de pulbere sunt încălzite împreună într-un creuzet de siliciu sau de platină (v. fig. 2. 1 a)). Pentru încălzire se poate folosi radiația emisă de pereții unui cuptor electric în care sunt introduși componenții, aceștia nefiind în contact cu

peretii cuptorului. De asemenea, încălzirea se mai poate face prin inducție cu un curent de radiofrecvență [2.3]. În cazul utilizării unui creuzet metalic pentru încălzirea componentilor prin inducție căldura este transferată prin conducție. Dacă se folosește un creuzet de siliciu componentii în stare de pulbere trebuie preîncălziți și apoi încălziți prin inducție. Astfel, topitura obținută este la o temperatură mai mare decât creuzetul fiind puțin probabil să se contamineze de la acesta. De obicei creuzetele din siliciu sunt folosite o singură dată dacă acestea nu sunt prevăzute cu un stand de reciclare termică. În mod tradițional miezul din sticlă sub formă de bară este introdus într-un tub care constituie învelișul și apoi ansamblul celor două este tras pentru a se obține fibra învelită. Cu ajutorul unui creuzet dublu prezentat în figura 2. 1 a) se pot obține fibre care au un diametru mare și de asemenea o apertură numerică mare (fig. v. 2. 1 b)).

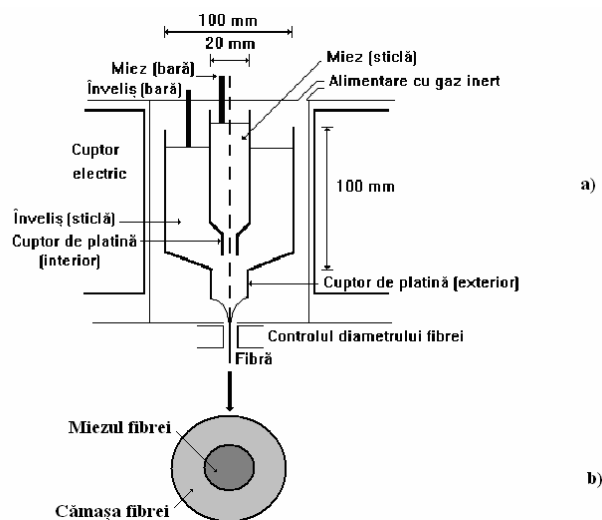


Fig. 2. 1. a) Reprezentarea schematică a creuzetului dublu, b) fibra învelită.

În cazul utilizării unui creuzet dublu se pot obține fibre optice din sticlă cu borosilicat de sodiu sau din sticlă cu borosilicat de sodiu și calciu, acestea fiind caracterizate de atenuări mici pe un domeniu spectral larg din vizibil până în IR (fig. 2. 2).

2.1.2. Metoda de depunere din stare de vapori

Întrucât temperatura de topire a sticlelor cu conținut mare de siliciu este prea ridicată în cazul metodei creuzetului, pentru producerea fibrelor se utilizează metoda de depunere din stare de vapori.

Există mai multe configurații experimentale, și anume: *depunere internă de vapori*, (*Inside Vapour Deposition-IVD*) în care gazele reactante generează straturi succesive în interiorul unui tub de cuarț, *depunere externă de vapori*, (*Outside Vapour Deposition-OVD*) în care straturile sunt depuse pe suprafața unei bare care apoi este îndepărtată, *depunere axială de vapori*, (*Vapour Axial Deposition-VAD*) în care se generează mai întâi o formă cilindrică axială etc.

Fibrele obținute prin aceste metode se caracterizează la lungimea de undă 1550 nm prin atenuări de $0,20 \div 0,22$ dB/km.

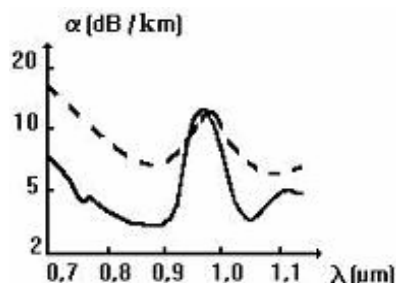
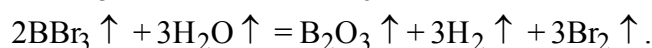
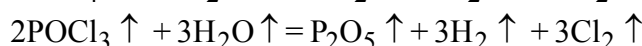


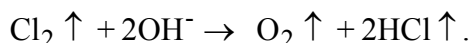
Fig. 2. 2. Dependența atenuării unei fibre obținute cu ajutorul unui creuzet dublu de lungimea de undă în cazul utilizării: sticlei din borosilicat de sodiu (curba continuă), sticlei din borosilicat de sodiu și calciu (curba punctată).

2.1.3. Metodele de depunere internă și externă din stare de vapori

În aceste cazuri, pentru sinteza particulelor fine de sticlă din cloruri se utilizează hidroliza în flacără, rezultând o sticlă poroasă și opacă. Reacțiile chimice tipice sunt:



Excesul de vapori de apă este îndepărtat chimic din sticla rezultată în urma reacțiilor:



În figura 2. 3 este prezentat schematic procesul de depunere externă de vapori. Prin hidroliză în flacără sticla se depune de-a lungul unei bare de aluminiu sub forma mai multor straturi. Apoi bara este uscată și urmează procesul de obținere a fibrei optice.

Variind concentrația componentilor se pot obține fibre având profilul indicelui de refracție fie de tip treaptă fie de tip gradient. În urma îndepărtării barei de aluminiu se obține o sticlă poroasă având formă cilindrică goală în interior. Apoi, aceasta este încălzită pentru a fi uscată în atmosferă de clor și sinterizată, pentru a se obține o bară de sticlă solidă și transparentă, din care în final rezultă fibra optică având lungimea cuprinsă între 40 și 50 km.

Utilizând acest procedeu se pot obține fibre omogene având atenuarea mică și de asemenea se poate face un bun control asupra profilului indicelui de refracție al fibrei.

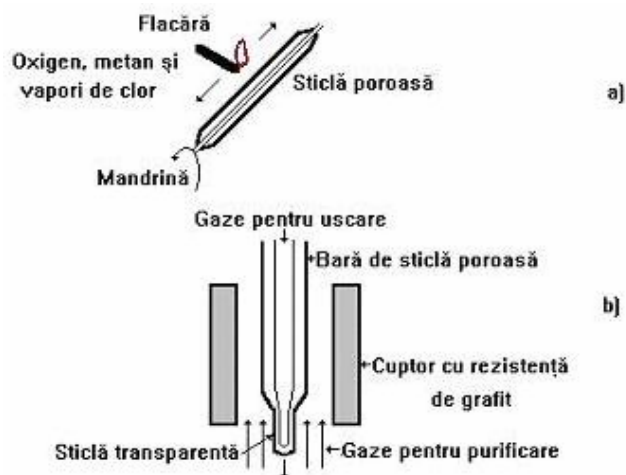


Fig. 2. 3. Schema procesului de depunere externă de vapori: a) depunerea stratului de sticlă poroasă pe o bară de aluminiu, b) uscarea și obținerea barei de sticlă transparentă.

2.1.4. Metoda de depunere axială de vapori

În cazul metodei de *depunere axială de vapori* sticlele care formează miezul și respectiv invelișul sunt depuse simultan la capetele unui germene sub formă de bară care mai întâi este rotit pentru a se asigura omogenitatea azimutală, iar apoi este tras în sus într-un cuptor electric cu viteza de 2,5 mm/min (fig. 2. 4).

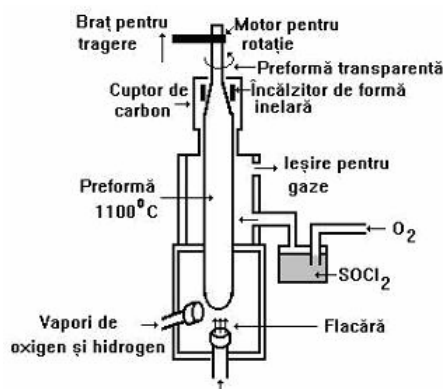


Fig. 2. 4. Schema procesului de depunere axială de vapori și de obținere a preformei.

Încălzirea se face la o temperatură cuprinsă între 1100 și 1200°C în atmosferă de oxigen și clor pentru a îndepărta orice urme de apă precum și ionii de hidroxil. Bara poroasă, care are un diametru de 60 mm este apoi încălzită la

temperatura de 1500°C într-un alt cuptor de carbon, în care se obține preforma de sticlă, transparentă, cu un diametru de 20 mm.

Utilizând această metodă se poate obține prin doparea cu germaniu un control rezonabil al indicelui de refracție menținând un profil corespunzător al temperaturii în jurul preformei poroase. Se pot obține astfel fibre având atenuări mai mici de 0,5 dB/km pentru radiații având lungimea de undă de 1,3 μ m, precum și dispersii temporale de aproximativ 0,2 ns/km.

2.1.5. Fibre optice amplificatoare

În figura 2. 5 este prezentat schematic montajul experimental utilizat pentru realizarea dopajului cu germaniu și ioni de Er^{3+} (elementul activ). În timpul depunerii miezului, camera de dopare este încălzită la aproximativ 1000°C pentru a mări presiunea vaporilor din interiorul tubului. Vaporii sunt încorporați cu principalii reactanți și sunt depuși pe straturile miezului în fibră. Camera de dopare conține un *burete* de siliciu impregnat cu pământuri rare.

Partea nedopată a miezului este depusă pe substratul interior tubului. Când se atinge această parte a miezului care urmează a fi dopată, temperatura este scăzută pentru a preveni topirea totală a sticlei. Această operație produce un *burete alb* și *poros* în interiorul tubului. Soluția de Er^{3+} (sau a oricărui codopant ce urmează a fi încorporat) este introdusă în tub ceea ce duce la umezirea porilor, proces ce durează aproximativ o oră. În acest fel se asigură o reproductibilitate mai mare a vaporilor. Lichidul este ulterior refulat din tub, iar straturile poroase sunt uscate.

Această operație este urmată de deshidratarea preformei prin încălzirea acesteia într-un gaz de O_2/Cl_2 injectat, timp de aproximativ o oră. Straturile poroase sunt topite cu atenție în atmosferă de O_2/Cl_2 lăsând un material complet uscat și preforma este apoi închisă.

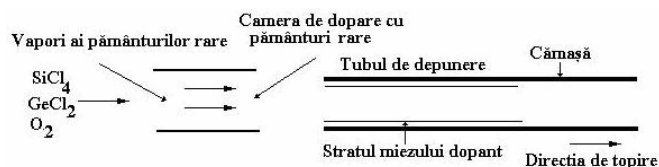


Fig. 2. 5. Schema procesului de depunere axială a Ge și a ionilor de Er^{3+} .

Fibrele optice amplificatoare amplifică radiația luminoasă ce se propagă prin acestea. În general, aceste fibre nu modifică polarizarea și pot fi conectate cu orice tip de fibră. Fibrele optice amplificatoare tipice sunt fibre monomod dopate cu Er^{3+} pe suport de silicați. Dopajul cu ionii de Er^{3+} din fibră determină scăderea pierderilor. În continuare, fibra este curățată într-un cuptor. Pentru a fi acoperită primar, fibra este trecută printr-o baie care conține soluția unui polimer și apoi este uscată fie cu raze ultraviolete fie cu ajutorul unui cuptor cu inducție. Aceeași operație se repetă în vederea acoperirii secundare. Aceste operații se efectuează într-o atmosferă fără praf pentru a micșora defectele de suprafață.

Acoperirea fibrei cu un înveliș de plastic se face cu ajutorul unui extruder prevăzut cu un melc care împinge materialul plastic topit asupra fibrei (fig. 2. 6).

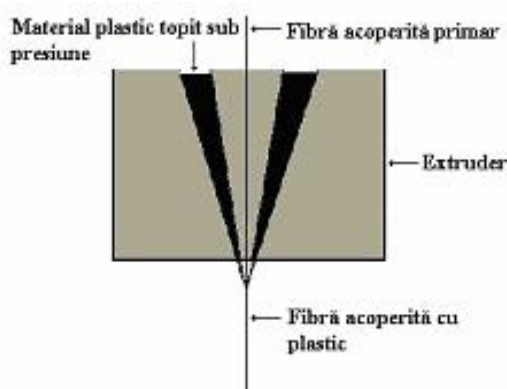


Fig. 2. 6. Schema procesului de acoperire a fibrei cu un înveliș de plastic.

Utilizând procedeele prezentate anterior se pot obține atât fibre optice cât și *cabluri optice* care conțin una sau mai multe fibre optice (fig. 2. 7).

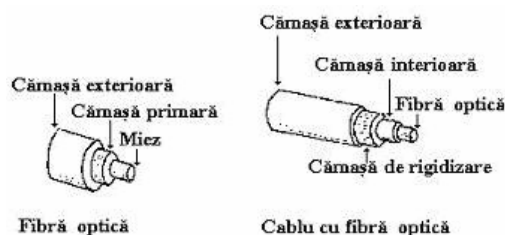


Fig. 2. 7. Fibră și cablu optic.

2.1.6. Fibre optice cu rețele Bragg

În ultimii ani, în telecomunicațiile optice având viteză mare de transmisie se utilizează tot mai mult pentru manipularea și multiplicarea pulsurilor optice precum și pentru a compensa fenomenul de dispersie *fibre optice care au încorporate rețele de difracție Bragg*.

Rețelele Bragg în fibrele optice pot fi fabricate cu ajutorul unei măști de fază cu perioadă constantă fie prin variația indicelui de refracție al fibrei fie prin modulația perioadei figurii de interferență din spatele măștii [2.10].

Variația indicelui de refracție al fibrei poate fi obținută supunând fibra în mod gradat unei deformații sau unui gradient de temperatură. De exemplu, s-a obținut o variație liniară a indicelui de refracție al fibrei pe o anumită porțiune prin încovoierea acesteia. Prin curbarea fibrei se induce un gradient liniar de tensiune de-a lungul fibrei, perioada de variație a indicelui de refracție fiind proporțională cu tensiunea mecanică aplicată fibrei pe acea porțiune.

Rețeaua Bragg în fibra optică poate fi fabricată și cu ajutorul unui laser cu Ar ionizat a cărui radiație din domeniul UV este focalizată cu o lentilă sferică pe masca de fază

și apoi eșantionată cu ajutorul unui modulator acustooptic a cărei perioadă determină perioada rețelei. Fibra este menținută în poziție înclinată în fața măștii. Forma dorită a profilului rețelei și perioada acesteia pot fi obținute prin mișcarea și respectiv înclinarea fibrei în timp ce fasciculul laser baleiază masca de fază. Pentru a obține rețele cu dimensiuni mari se deplasează fibra în mod continuu și controlat în fața măștii în zona de interferență.

Printr-un control riguros al deplasării fibrei și al modulatorului acustooptic se pot obține rețele cu variații mici ale perioadei și o valoare exactă a dispersiei.

În figura 2. 8 este prezentată reflectivitatea normalizată și întârzierea temporală a pulsului în domeniul IR al spectrului în cazul unei fibre optice care are încorporată o rețea Bragg și este obținută prin metoda prezentată anterior.

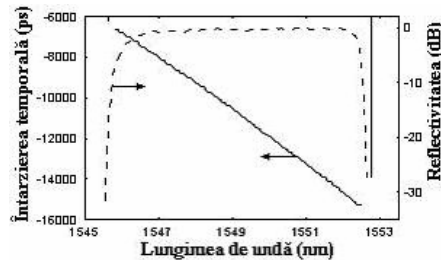


Fig. 2. 8. Reflectivitatea normalizată și întârzierea temporală a unei fibre optice cu rețea Bragg în domeniul IR al spectrului.

2.1.7. Fibre optice cu cristale fotonice

Fibrele cu cristale fotonice au fost fabricate pentru prima dată în anul 1998 [2.11]. Conceptul de *cristal fonic* a fost introdus în anul 1995 pe baza analogiei optice dintre structura benzilor electronice interzise ale semiconductoarelor și structurile dielectrice periodice [2.11], [2.12].

Fibrele cu cristale fotonice sunt caracterizate de o variație mare a indicelui de refracție al materialului din care este fabricată fibra și pot fi de două feluri. Există fibre care conțin un miez din Si solid, (care este izotrop) înconjurat de un cristal fonic bidimensional cu indice de refracție mai mic decât cel al miezului care formează cămașa, acestea conducând lumina pe baza fenomenului de reflexie internă totală și asemănându-se cu fibrele clasice. În ultimii ani s-au fabricat și fibre care conțin un cristal fonic de tip fagure care are o structură de benzi interzise și care contribuie la ghidarea luminii în regiunea miezului (fig. 2. 9 a)). În acest caz miezul are un indice de refracție mai mic decât al cămășii și determină o distrugere a periodicității cristalului fonic rezultând o supercelulă care se repetă periodic în fibră (fig. 2. 9 b)).

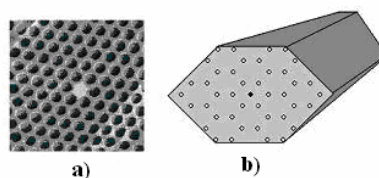


Fig. 2. 9. Fibră optică cu cristal fonic: a) tip fagure, b) cu supercelulă care se repetă periodic.

Se introduce astfel o regiune spațială (defect) cu proprietăți optice diferite decât ale cristalului fonic și în care sunt excitate moduri cu frecvențele distribuite printre cele ale cristalului fonic, aceste moduri fiind puternic conținute în defect dacă supercelula are dimensiuni mai mari decât dimensiunile modurilor ghidate în miez [2.12].

Pentru a fabrica o fibră optică cu cristal fonic este necesară mai întâi crearea unei preforme care să conțină la nivel macroscopic structura dorită.

O primă posibilitate constă în formarea unui număr de goluri (de la câteva zeci până la câteva sute) dispuse periodic în preformă. Altă posibilitate, mai ieftină, rapidă și flexibilă prezentată în figura 2. 10 este legată de realizarea unui mănunchi de tuburi capilare și bare din sticlă (fig. 2. 10 a)) având un diametru de 20 mm care să formeze structura aer-sticlă dorită și respectiv profilul corespunzător al indicelui de refracție (fig. 2. 10 b)).

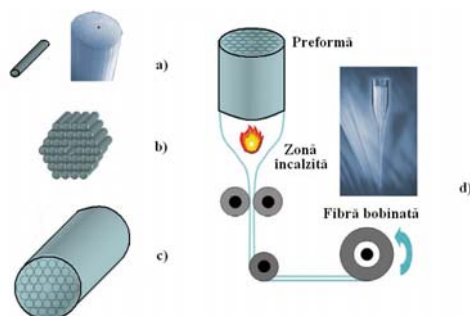


Fig. 2. 10. Reprezentarea schematică a procesului de fabricare a unei fibre cu cristale fonice.

În continuare structura (fig. 2. 10 c)) este încălzită (topită) într-un cuptor la temperaturi cuprinse între 1900 °C și 2100 °C, iar apoi trasă până când diametrul acesteia devine $80 \div 200 \mu\text{m}$ (fig. 2. 10 d)). Pentru a controla diametrul golurilor de aer din interiorul structurii în timpul procesului de tragere în interiorul preformei se mărește presiunea în raport cu mediul înconjurător. Procesul de fabricare poate fi controlat printr-o alegere adecvată a temperaturii preformei, a timpului de tragere a acesteia, dar și a presiunii din interiorul ei. În final, fibra cu cristale fonice este învelită cu un strat de protecție standard pentru a i se asigura robustețea.

Pe baza celor prezentate anterior este posibilă fabricarea fibrelor cu mai multe miezuri, mai dificil de realizat în fibrele clasice. Fibrele cu mai multe miezuri pot fi aplicate în telecomunicațiile optice cu mai multe canale, la fabricarea senzorilor etc.

2.1.8. Fibre optice din plastic

În ultimii douăzeci de ani s-au dezvoltat tot mai multe fibre din plastic (*Plastic Optical Fiber-POF*), acestea fiind foarte flexibile și având un preț redus de fabricare. Miezul fibrei este fabricat dintr-un polimer, de exemplu: polimetilmetacrilat (*PMMA*), polistiren, polimetilfenilsiloxanic etc., iar cămașa

dintr-o rășină siliconică. Indicele de refracție al miezului este cuprins în intervalul $1,49 \div 1,59$ [2.3].

Pentru fabricarea fibrelor din plastic se pot utiliza aceleași metode ca și în cazul celor din bioxid de siliciu (cuarț), temperatura preformei fiind de 200°C . Miezul fibrei poate fi dopat cu coloranți organici și cromofori, în acest caz fibra fiind utilizată pentru fabricarea unor dispozitive optoelectronice. Diametrul fibrelor optice din plastic este de $0,25 \div 1$ mm, deci apertura numerică a acestora poate atinge valori ridicate.

În ultimii ani au fost fabricate fibre optice microstructurate din polimeri (*mPOF*), având o structură asemănătoare cu cea a unei fibre cu cristale.

Din cauza atenuării mari fibrele optice din plastic nu sunt utilizate în telecomunicații pe distanțe mari ci numai pentru distanțe mai mici de 100 m și, de asemenea, pentru fabricarea senzorilor optici și pentru iluminat.

2.2. Metode de producere a ghidurilor optice de undă

2.2.1. Structura ghidurilor optice de undă

Ghidurile optice de undă, cunoscute și sub numele de ghiduri dielectrice, sunt structuri de tip *sandwich* care se folosesc pentru confinarea și ghidarea luminii într-un singur sau în mai multe moduri de oscilație în dispozitivele și circuitele optice integrate.

Spre deosebire de fibra optică, ghidurile folosite în circuitele optice integrate au de cele mai multe ori o structură planară, cum ar fi de exemplu filmele plane sau panglicile (*strips*). Cel mai simplu ghid dielectric de formă planară este prezentat în figura 2. 11 și este dispus sub forma unui sandwich între un substrat și respectiv un superstrat.

Indicele de refracție corespunzător ghidului este mai mare decât cel al substratului și respectiv al superstratului. Foarte des, materialul din care este constituit superstratul este chiar aerul care are indicele de refracție egal cu unitatea.

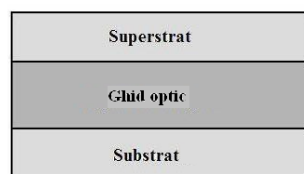


Fig. 2. 11. Secțiune printr-un ghid optic planar.

De obicei, ghidurile au dimensiuni de ordinul micronilor, iar diferențele dintre indicii de refracție corespunzători ghidului și respectiv substratului sunt cuprinse în intervalul $0,1 \div 0,001$. Ghidurile pentru care diferența dintre indicii de refracție corespunzători superstratului și respectiv substratului este cuprinsă în intervalul $0,01 \div 0,001$ sunt obținute prin difuzie ionică sau schimb ionic, iar cele pentru care această diferență este aproximativ 0,1 sunt heterostructuri semiconductoare sau au fost obținute prin schimb protonic.

Fracțiunea din puterea undelor luminoase care este confinată în regiunea de ghidare depinde atât de indicele de refracție al acestuia cât și de dimensiunile ei. De obicei, mai mult de 80% din putere este confinată în ghid.

Efectul de confinare în cazul ghidurilor planare este obținut numai după o direcție, în planul filmului putând să se manifeste fenomenul de difracție. Cu toate acestea, fenomenele cele mai interesante care pot apărea în ghid se pot manifesta numai în planul care conține direcția de confinare.

În funcție de forma secțiunii transversale se pot fabrica și alte tipuri de ghiduri (fig. 2. 12).

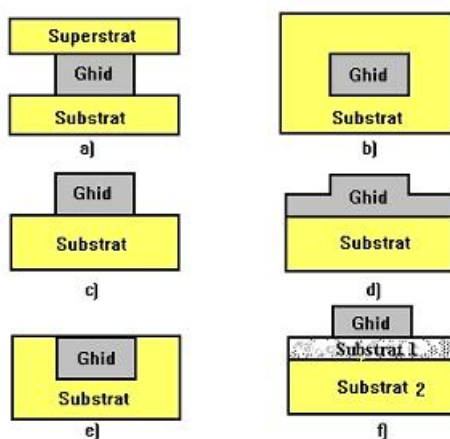


Fig. 2. 12. Tipuri de ghiduri canal: a) general, b) îngropat în substrat, c) panglică (situat la suprafața substratului), d) nervură (situat la suprafața substratului), e) încăstrat în substrat, f) creastă (situat la suprafața substratului).

Ghidurile canal sunt de mai multe feluri, în funcție de poziția relativă a ghidului propriu-zis față de substrat și respectiv superstrat, și anume: general (fig. 2. 12 a)), îngropat în substrat (*buried*) (fig. 2. 12 b)), situat la suprafața substratului și având forma unei panglici (*raised strip*) (fig. 2. 12 c)), situat la suprafața substratului și având forma unei nervuri (*rib*) (fig. 2. 12 d)), încăstrat în substrat (*embedded*) (fig. 2. 12 e)), situat la suprafața substratului și având forma unei creste (*ridge*) (fig. 2. 12 f)).

În cazul ghidurilor de tip canal fasciculele luminoase se propagă fără a suferi fenomenul de difracție pe distanțe (de ordinul centimetrilor) care sunt limitate practic numai de absorbția și împrăștierea acestora în ghid.

Metodele cel mai des utilizate pentru fabricarea ghidurilor optice de undă sunt: *difuzia* (de exemplu, în cazul titaniului în niobatul de litiu (LiNbO_3)) și *depunerea din stare de vapori* (de exemplu, în cazul SiO_2).

Pentru a fabrica un ghid optic de undă este necesar ca în substrat (sticla, niobatul de litiu etc.) să fie modificat local indicele de refracție. Utilizând materiale anorganice, ghidurile optice de undă se pot obține prin mai multe metode dintre care cele mai importante sunt:

a) *doparea unui material*, de exemplu, LiNbO_3 , cu atomii unui element mai greu (de exemplu, Ti) prin *difuzia* acestuia, utilizând tehnica microlitografiei [2.1], [2.2];

b) *metoda schimbului ionic* dintre ionii unui material *gazdă* (de exemplu, ionii de Na din sticlă) și alți ioni având aproximativ aceleași dimensiuni care în urma procesului de difuzie produc o variație locală a indicelui de refracție (de exemplu, ionii de Ag) [2.2];

c) *metoda schimbului protonic*, care are loc de exemplu între ionii de litiu aparținând unui substrat de LiNbO_3 și acidul benzoic sau benzoatul de litiu [2.2].

În general, realizarea ghidurilor optice de undă prin diferite metode (difuzie, schimb ionic etc.) se face pe baza unor tehnologii moderne care se bazează pe așa-numitele tehnici de *fotolitografiere* și de *difuzie*, similare cu cele utilizate în industria microelectronică.

Cuvântul litografie provine din limba greacă fiind format din alte două cuvinte: *lithos*, care înseamnă piatră și *graphia*, care înseamnă a scrie. În cazul nostru, piatra este de exemplu *substratul* de LiNbO_3 , Si etc., iar formele sunt scrise cu ajutorul unui polimer sensibil la lumină numit *fotorezist*.

Litografia optică (fotolitografierea) este un proces fotografic prin care fotorezistul este expus radiațiilor ultraviolete și apoi dezvoltat pentru a forma imagini în relief (tridimensionale) pe substrat.

În general etapele unui proces tipic de fotolitografiere sunt (fig. 2. 13): pregătirea (curățarea) substratului, (fig. 2. 13 a)), acoperirea cu fotorezist (fig. 2. 13 b)), sinterizarea preliminară (fig. 2. 13 c)), alinierea și expunerea la radiații ultraviolete (fig. 2. 13 d)), dezvoltarea (fig. 2. 13 e)), gravarea și implantul (fig. 2. 13 f)), iar în final înlăturarea fotorezistului și sinterizarea finală.

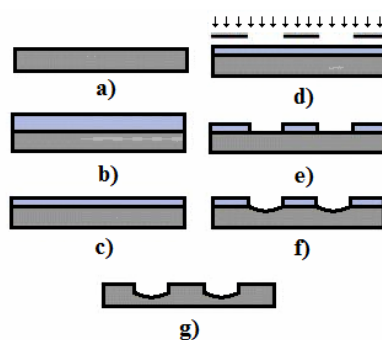


Fig. 2. 13. Etapele unui proces tipic de fotolitografiere: a) pregătirea substratului, b) acoperirea cu fotorezist, c) sinterizarea preliminară d), alinierea și expunerea la radiații ultraviolete, e) dezvoltarea, f), gravarea și implantul și g) înlăturarea fotorezistului și sinterizarea finală.

În cazul difuziei se pot utiliza *măști fotolitografice* pentru a defini canalele prin care materialul care urmează a fi difuzat să pătrundă în substrat.

Operația de gravare poate fi: umedă (chimică) și uscată (ionică). În cazul gravării umede se utilizează un amestec de acizi HF și HNO₃, cu care se atacă substratul, iar în cazul celei uscate se utilizează fascicule de ioni (plasmă) care sunt focalizați pe substrat.

Câteva proprietăți mai importante ale materialelor cel mai des utilizate în fabricarea ghidurilor optice de undă sunt prezentate în tabelul 2. 1.

Tabelul 2. 1.

Material	Pierderi la propagare (dB/cm)	Pierderi la capete (dB/chip)	Indice de refracție	Variația indicelui de refracție Δn	Birefrință $n_{TE} - n_{TM}$
LiNbO ₃	0,5	2,0	2,2	0-0.5 % ghid de tip canal	$10^{-2} - 10^{-1}$
SiO ₂	0,1	0,5	1,5	0-15 % ghid de tip canal	$10^{-4} - 10^{-2}$
Si	0,1	1,0	3,5	70 % Si pe izolator	$10^{-4} - 10^{-2}$
Sol-Gel	0,1	0,5	1,2-1,5	0-1.5 % ghid de tip canal	$10^{-4} - 10^{-2}$
Polimeri	0,1	0,5	1,3-1,7	0-35 % ghid de tip canal	$10^{-6} - 10^{-2}$
GaAs	0,5	2,0	3,4	0-14 % 14 % AlAs ghid de tip nervură	10^{-3}

2.2.2. Producerea ghidurilor optice de undă prin difuzie

În cazul fabricării ghidurilor optice prin difuzie substratul folosit cel mai des este cel de niobat de litiu. Există mai multe etape de desfășurare a procesului. În funcție de modul de întrebuințare a ghidului optic (activ sau pasiv), în diferite montaje experimentale, acestea se pot dopa și cu alți atomi sau ioni (de obicei ionii pământurilor rare: Nd³⁺, Er³⁺, etc.) înainte sau după procesul de difuzie a Ti [2.13], [2.14].

Difuzia titanului în substratul de LiNbO₃. În urma dopajului cu erbiu are loc fabricarea propriu-zisă a ghidului optic, diferitele etape ale procesului fiind prezentate în figura 2. 14.

Prima etapă constă în depunerea pe suprafața LiNbO₃ a unui strat dintr-un material fotorezistiv (fig. 2. 14 a)) care este impresionat în urma trecerii luminii ultraviolete printr-o mască determină forma ghidului (fig. 2. 14 b)). În urma tratării cu un agent chimic potrivit (fig. 2. 14 c)) se gravează în fotorezist forma ghidului.

Depunerea stratului de titan pe substrat cu grosimi variind între 940 Å și 950 Å se face prin pulverizarea uniformă a acestuia (*sputtering*) (fig. 2. 14 d)) într-o instalație de depunere sub vid (fig. 2. 15).

Prin înlăturarea stratului de fotorezist în urma introducerii substratului într-o baie cu acetona se obține un strat de Ti (fig. 2. 14 e)) având dimensiunile bine

determinate și în poziția dorită (*lift off*). În final, substratul este introdus într-un cuptor având temperatura de 1030°C, timp de 9 ore, proces în urma căruia are loc difuzia titanului în acesta (fig. 2. 14 f).

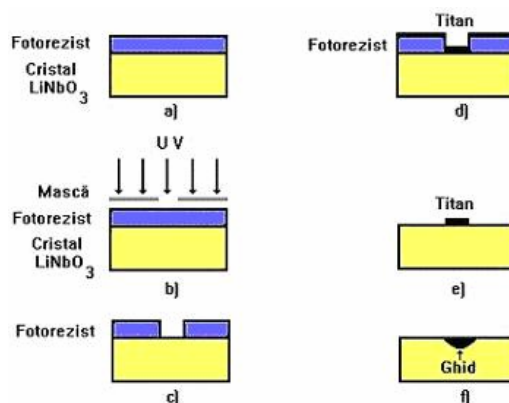


Fig. 2. 14. Etapele procesului de fabricare a ghidurilor optice de undă de tip Ti:LiNbO₃ :

- a) depunerea stratului de fotorezist; b) iradierea cu radiații UV;
- c) tratarea cu agent chimic; d) depunerea stratului de Ti prin pulverizare (*sputtering*); e) *lift off*; f) difuzia Ti.

Fenomenele de difuzie sunt guvernate de legea lui Fick care leagă fluxurile de atomi difuzați de gradientul de concentrație a acestora. În cazul unidimensional legea Fick poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.1)$$

unde C este concentrația, x reprezintă coordonate, t este timpul, iar D este coeficientul de difuzie.

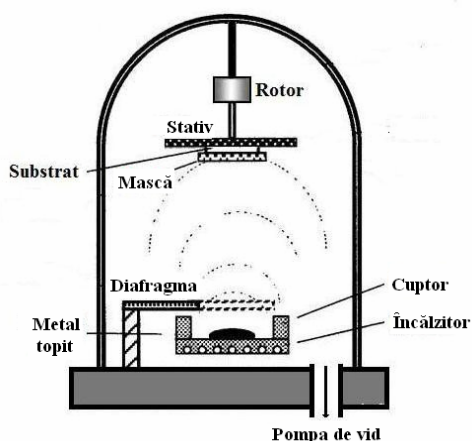


Fig. 2. 15. Reprezentarea schematică a instalației de depunere.

Coeficientul de difuzie depinde de temperatură conform legii Arrhenius:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.2)$$

unde E_a este *energia de activare*, T este temperatura, R constanta universală a gazelor, iar D_0 este factorul de frecvență.

Difuzia erbiului. O altă etapă (de obicei prima) constă în depunerea pe întreaga suprafață a substratului de niobat de litiu a elementului activ (de exemplu, erbiu metalic în cazul funcționării ghidului ca dispozitiv laser sau amplificator laser) în urma procesului de evaporare până când grosimea stratului acestuia este uniformă. Grosimea stratului de erbiu depus este de 9 nm în cazul substratului de LiNbO_3 tăiat după axa x și de 11 nm în cazul celui tăiat după axa z . După aceea, substratul de LiNbO_3 este introdus într-un cuptor cu temperatura de 1100°C , timp de 100 de ore, proces în urma căruia erbiul difuzează în niobatul de litiu. Folosind tehnicile spectrometriei ionice de masă se poate determina profilul concentrației erbiului (fig. 2. 16).

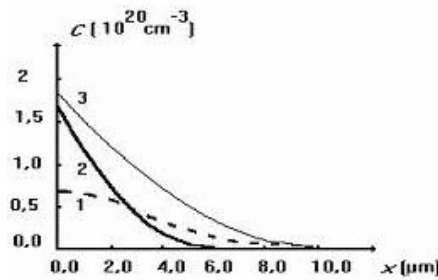


Fig. 2. 16. Profilul concentrației de Er în funcție de adâncime: profilul 1 este de tip gaussian (curba punctată), temperatura cuptorului: 1100°C , timp: 100 h; profilul 2 este de tip erfc (curba mai groasă), temperatura cuptorului: 1080°C , timp: 50 h; profilul 3 este de tip erfc (curba mai subțire), temperatura cuptorului: 1100°C , timp: 100 h.

Definind prin t intervalul de timp în care erbiul depozitat pe substrat a pătruns în cristal (LiNbO_3), în cazul unor intervale de timp mult mai mari decât acesta, profilul concentrației de difuzie $C(x, t)$ poate fi aproximat cu o funcție de tip Gauss, de forma:

$$C(x, t) = \bar{C}_0(t) \exp\left[-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2\right] \quad (2.3)$$

în care: D este coeficientul de difuzie,

$$\bar{C}_0(t) = \frac{kd}{\sqrt{\pi Dt}}, \quad (2.4)$$

$$k = \frac{\rho N_A}{M_{rel}}, \quad (2.5)$$

N_A reprezintă numărul lui Avogadro, ρ este densitatea, iar M_{rel} este masa moleculară a erbiului.

Profilul concentrației de difuzie mai poate fi aproximat în modelările matematice și cu funcția complementară a erorilor (*erfc*).

2.2.3. Fabricarea ghidurilor optice prin schimb ionic. Principii fizice

Modificarea locală a indicelui de refracție se realizează în cazul schimbului ionic prin difuzia atomilor de argint, potasiu etc. în substrat, acești atomi înlocuind ionii de sodiu care ies din sticlă. Variația indicelui de refracție obținută depinde de polarizabilitatea și dimensiunile ionilor care se schimbă.

Dacă de exemplu se înlocuiește ionul de sodiu din sticlă cu un ion exterior de dimensiuni mai mici se obține o mărire locală a indicelui de refracție pentru că densitatea sticlei crește prin comprimarea rețelei sticlei în jurul ionului introdus (ca în cazul schimbului litiu/sodiu de exemplu).

Procesul de difuzie al ionilor în sticlă poate fi modelat pe baza schemei prezentate în figura 2. 17 în care se consideră că schimbul ionic are loc într-o baie ce conține sarea ionului notat cu (1) și sticlă care conține ionul (2).

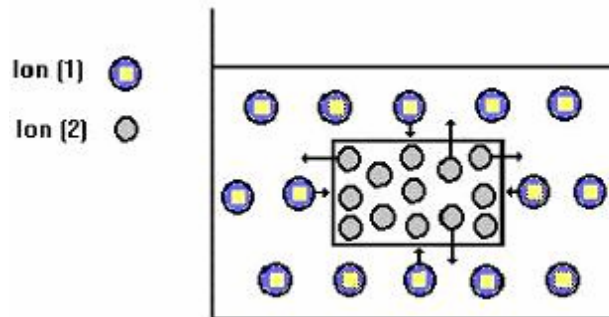


Fig. 2. 17. Principiul schimbului ionic dintre o sare, conținând ionul (1) și sticlă, conținând ionul (2).

Cinetica evoluției concentrațiilor depinde de mobilitățile diferite ale celor două tipuri de ioni. Diferența de viteză a ionilor difuzanți determină fluxuri diferite ale acestora. Sistemul tinzând spre echilibru termodinamic, în sticlă se creează sarcini spațiale care frânează ionii rapizi și îi accelerează pe cei lenți.

La fel ca în cazul difuziei Ti în LiNbO_3 și aceste fenomene de difuzie sunt guvernate tot de legea lui Fick care leagă fluxurile de ioni (1) și (2) de gradientul de concentrație. În cazul unidimensional, legea lui Fick poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) = \frac{\partial C_1}{\partial t} \quad (2.6)$$

în care:

$$\bar{D} = \frac{D_1 D_2 (C_1 + C_2)}{D_1 C_1 + D_2 C_2} = \frac{D_1 D_2}{N_1 D_1 + N_2 D_2}, \quad (2.7)$$

$$N_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}, N_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.8)$$

În relațiile (2.7) și (2.8) N_i reprezintă fracția molară a ionului i , C_i este concentrația aceluiasi ion, \bar{D} este *coeficientul de interdifuzie*, D_i este coeficientul de difuzie al ionului i , dat de relația:

$$D_i = D_{i0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \quad (2.9)$$

În relația (2.9) E_a este energia de activare, iar D_{i0} reprezintă factorul de frecvență.

Întrucât în cazul general coeficientul de interdifuzie \bar{D} depinde de concentrația ionului (1) care migrează în sticlă, nu este posibil să se obțină o soluție analitică a ecuației (2.6). Pentru a obține profilul concentrației, aceasta trebuie rezolvată prin metode numerice. Notând cu

$$\alpha = 1 - \frac{D_1}{D_2} \quad (2.10)$$

se poate scrie:

$$D = \frac{D_1}{1 - \alpha \frac{C_1}{C_1 + C_2}} \quad (2.11)$$

Pentru a estima valoarea lui α trebuie comparate profilurile indicilor obținute teoretic și experimental. Pe baza rezultatelor numerice prezentate în figura 2. 18 se pot deduce următoarele concluzii [2.1]:

a) *când α tinde la zero*, adică $D_1 \approx D_2$ profilul indicelui este asemănător funcției complementare a erorilor;

b) *când coeficientul $D_1 \ll D_2$* , profilul indicelui este abrupt și se apropie de funcția lui Heaviside. În acest caz, din punct de vedere fizic, tendința ionilor (2) este de a ieși din sticlă mult mai repede ca ionii (1) să pătrundă în aceasta pentru a-i înlocui. Acest fapt conduce la apariția unei sarcini spațiale suplimentare care frânează ionii (2) și echilibrează astfel fluxul ionic. Un astfel de profil de indice abrupt este numit și *salt de indice*, iar *frontul* de schimb se propagă cu o viteză proporțională cu coeficientul D_1 .

În aceste cazuri simple ecuația Fick are o soluție analitică și permite regăsirea concluziilor prezentate anterior (cazul în care coeficienții de autodifuzie sunt egali $D_1 = D_2 = D$).

De asemenea, dacă concentrația unui ion este mică, de exemplu C_1 , se pot face următoarele aproximații:

$$N_1 \sim 0 \Rightarrow N_2 \rightarrow 1 \Rightarrow \bar{D} \sim D_1 \quad (2.12)$$

În acest caz, valoarea coeficientului de autodifuzie D_1 a ionilor care difuzează în sticlă nu este influențată de prezența ionilor de același tip care au migrat deja în substrat și deci acesta este independent de coordonata x , ecuația (2.6) putând fi scrisă sub forma:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.13)$$

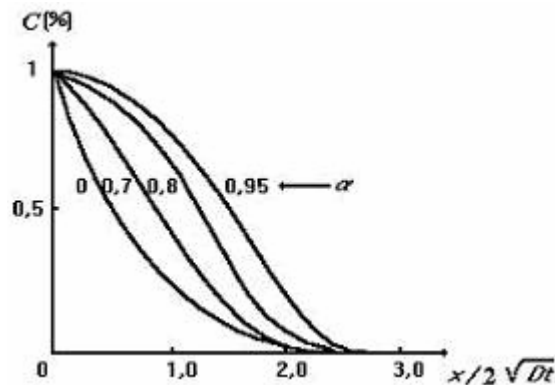


Fig. 2. 18. Variația profilului concentrației în funcție de distanța normalizată, $x / 2\sqrt{Dt}$ pentru diferite valori ale coeficientului α .

Ținând seama de condițiile inițiale:

$$\begin{cases} C(0, t) = C_0 \forall t \geq 0, \\ C(x, 0) = 0 \forall x > 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

soluția ecuației (2.13) este:

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.15)$$

unde erfc este funcția complementară a erorilor, definită de relația:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (2.16)$$

Fabricarea ghidurilor optice prin schimb ionic în sticlă. Unul dintre materialele cel mai des utilizate în procesul de schimb ionic este sticla, de exemplu cea cu indicativul B1664 Corning.

Această varietate de sticlă conține 9,9%Na₂O, 8%K₂O, 68% SiO₂, 11% B₂O₃, 2,4% BaO și 0.3% - alte componente având indicii de refracție $n_s=1,5147$. În procesul schimbului ionic există mai multe etape care sunt prezentate în figura 2. 19. Prima etapă constă în realizarea unei măști din aluminiu

cu configurația și geometria dorite pe suprafața sticlei (fig. 2. 19 a)). Această etapă constă din:

- curățarea plăcuței (substratului) de sticlă,
- evaporarea materialului din care este confecționată masca,
- procesul de fotolitografiere.

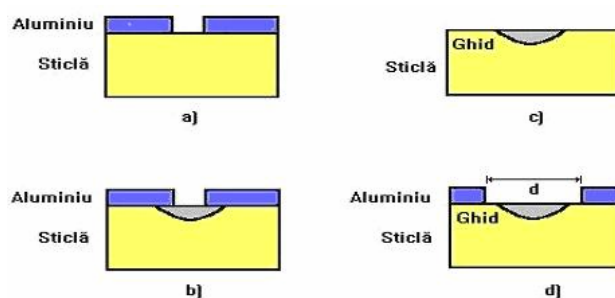


Fig. 2.19. Fabricarea unui ghid optic prin metoda schimbului ionic; a) realizarea măștii din aluminiu; b) procesul de fotolitografiere; c) atacul cu agent chimic; d) depunerea electrozilor.

De obicei, dimensiunile (lărgimea) formelor geometrice (*ferestrelor*) care urmează a fi gravate pe substrat sunt de câțiva μm .

În continuare, plăcuța este introdusă într-o baie care conține sare de nitrat de potasiu (KNO_3) aflată la temperatura de 400°C , timp de 2 ore. În acest interval de timp prin *ferastră* are loc fenomenul de schimb ionic între ionii de sodiu conținuți în matricea sticlei și ionii de potasiu din baia cu sare. În urma schimbului ionic se obține o creștere a indicelui de refracție a sticlei în regiunea determinată de *ferastră* (fig. 2. 19 b)). Profilul indicelui și/sau concentrației ionilor este descris de funcția complementară a erorilor. Ghidul astfel obținut nu poate conduce lumina din cauza pierderilor optice ridicate introduse de metalul plasat de ambele părți ale ghidului. Înlăturarea metalului se face prin atac cu un agent chimic, obținându-se un ghid optic cu lărgimea limitată (fig. 2. 19 c), d)).

În urma procesului de polizare (sau de clivare) a plăcuței de sticlă se pot înlătura pierderile care rezultă în urma cuplării luminii din zona de difuzie de la capătul ghidului cu alte componente optice.

Fabricarea electrozilor. De foarte multe ori este necesară obținerea unor componente optice ghidate complexe, cum ar fi: modulatori, comutatoare, lasere integrate care să funcționeze în regim de cuplare a modurilor (*mode-locking*) sau de comutare a pierderilor (*Q-switched*).

În aceste cazuri, funcționarea componentelor amintite este controlată prin intermediul unui câmp electric exterior cu ajutorul electrozilor depuși de ambele părți ale ghidului optic (fig. 2. 19 d)).

Fabricarea electrozilor constă în realizarea unei *ferestre* având o anumită lărgime d (fig. 2. 19 d)) mărginită de o mască metalică ce pleacă în procesul de fabricație de la etapa prezentată în figura 2. 19 b)). Pentru aceasta se depune o rășină pe substrat și se iluminează cu radiații ultraviolete fața opusă ghidului

(fig. 2. 20). Stratul de rășină este iluminat un anumit interval de timp t în urma trecerii luminii prin fereastră.

Din cauza difracției și a difuziei razelor ultraviolete în rășină, porțiunea iluminată este mai largă decât fereastra inițială. În continuare se dezvoltă rășina astfel iluminată și se atacă chimic masca metalică (v. fig. 2. 18 d)) obținându-se astfel electrozii propriu-ziși. Variind timpul de expunere cu lumină ultravioletă, t se pot obține electrozi situați la diferite distanțe unul față de altul.

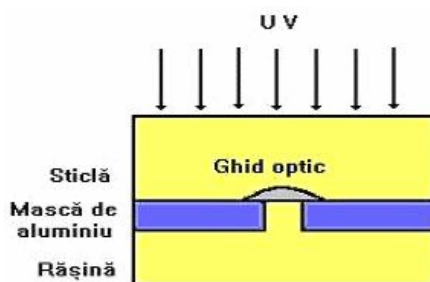


Fig. 2. 20. Procesul de fabricare a electrozilor.

2.2.4. Producerea ghidurilor optice în LiNbO_3 prin schimb protonic

Pentru fabricarea ghidurilor optice în LiNbO_3 prin schimb protonic se utilizează diferite băi care conțin protoni, cum ar fi de exemplu: acidul benzoic, acidul palmitic, acidul stearic [2.6], acidul oleic [2.7] etc.

Într-o astfel de baie, după realizarea operației de mascare, substratul de LiNbO_3 este încălzit la temperaturi de $150 \div 200^\circ\text{C}$ timp de 5 min \div 10 h. Pentru a evita șocurile termice cât și pentru a favoriza pătrunderea mai rapidă a ionilor de H^+ în substrat pentru a substitui atomii de Li, probele sunt deplasate vertical cu viteză redusă în baie; aceasta este introdusă într-un cuptor dispus de asemenea în poziție verticală și a cărei temperatură este controlată cu o precizie de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. După terminarea operației de schimb protonic substratul este spălat (de exemplu, în acetonă) pentru a îndepărta resturile de acid, iar baia este golită și apoi reîncărcată cu acid. Adâncimea de pătrundere d a ionilor de hidrogen în substratul de LiNbO_3 este dată de relația:

$$d(t, T) = 2\sqrt{t \cdot D(T)} \quad (2.17)$$

în care: $D(T)$ este coeficientul de difuzie, T este temperatura, iar t este timpul în care are loc procesul de schimb. În cazul unor ghiduri având ca substrat LiNbO_3 care au fost obținute în urma schimbului protonic în acid oleic la temperatura de 250°C timp de 8 ore, adâncimea de pătrundere este de aproximativ $3 \mu\text{m}$, iar diferența indicilor de refracție dintre substrat și ghid de 0,130 [2.7].

2.2.5. Fabricarea ghidurilor monomodale îngropate în substrat de Si

Din cauza pierderilor mici pe care le posedă atât la propagare cât și la cuplajul cu fibrele optice, ghidurile monomodale îngropate, având ca substrat

siliciul, sunt foarte des utilizate pentru producerea interferometrelor Mach-Zehnder simetrice și asimetrice (care sunt aplicate cu succes la procesele de multiplexare și respectiv demultiplexare optică), comutatoarelor optice, cuplorilor optici acordabili etc. (fig. 2. 21 a-c)).

În cadrul acestei etape particulele foarte fine de sticlă obținute prin hidroliza în flacără a SiCl_4 - TiCl_4 sunt depuse pe substratul de siliciu, care apoi este încălzit pentru a se consolida.

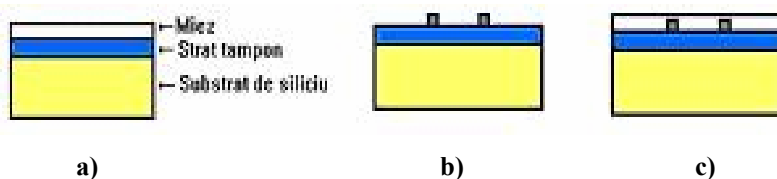


Fig. 2. 21. Schema procesului de fabricare a ghidurilor monomodale îngropate având ca substrat siliciul: a) obținerea pe substratul de siliciu a unui ghid planar de SiO_2 - Ti_2 , b) operația de gravare cu ioni reactivi și mascare, c) operația de îngropare a ghidurilor.

Operația de hidroliză în flacără este prezentată schematic în figura 2. 22. În cadrul acesteia un amestec de SiCl_4 - TiCl_4 sau de SiCl_4 - GeCl_4 este introdus într-o flacără de oxigen/hidrogen. Particulele fine de sticlă sunt depuse direct pe substratul de siliciu care la rândul său este plasat pe o masă cu diametrul de 1 m care se poate roti. În timpul depunerii flacără traversează în mod repetat masa în direcție radială. Pentru a micșora temperatura de topire a particulelor de sticlă în mixtura de gaz se adaugă mici cantități de BCl_3 și PCl_3 .

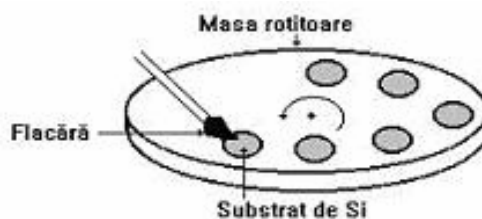


Fig. 2. 22. Operația de depunere prin hidroliză în flacără.

Indicele de refracție al particulelor de sticlă este controlat prin doparea cu TiCl_4 sau GeCl_4 . Ghidurile propriu-zise rezultă în urma procesării miezului de pe suprafața stratului tampon cu o mixtură de gaze formată din C_2F_6 și C_2H_4 (gravare cu ioni reactivi) și o mască din siliciu amorf (v. fig. 2. 21 b)). Masca de siliciu la rândul său se poate obține prin gravarea cu ioni reactivi a unui fotorezist (folosind un gaz de CBrF_3). În etapa a treia (v. fig. 2. 21 c)), ghidurile sunt

îngropate în urma depunerii prin hidroliza în flacără a unui strat de sticlă protectoare.

Prin procedeul descris se pot obține *ghiduri optice de undă îngropate* de formă pătrată cu dimensiunea de $8\mu\text{m}$, stratul tampon având $7\mu\text{m}$, iar cel protector $30\mu\text{m}$ [2.5]. Indicele de refracție al ghidului este cu aproximativ 24% mai mare decât cel corespunzător stratului tampon și respectiv al celui protector (care au indici de refracție egali). În cazul unor ghiduri având 40 mm lungime pierderile la propagare sunt de aproximativ 0,43 dB, iar pierderile la cuplajul cu o fibră sunt de 0,01 dB.

Atât dimensiunile ghidurilor astfel obținute cât și diferența relativă a indicilor de refracție sunt compatibile cu fibrele optice monomodale convenționale.

2.2.6. Fabricarea ghidurilor din Si

Multe dispozitive optice integrate complexe sunt fabricate din Si atât datorită prețului scăzut al materialului, posibilităților de integrare pe același substrat cu componentele electrice cât și datorită tehnicilor de producere din industria microelectronică care s-au perfecționat foarte mult în ultimii ani [2.5], [2.15].

Fabricarea ghidurilor de Si pe substrat izolator. Majoritatea dispozitivelor fotonice din Si au fost fabricate utilizându-se o structură de tip sandwich (fig. 2. 23) formată din Si cristalin, SiO_2 având dimensiuni de ordinul μm și un substrat izolator din Si cu dimensiuni de ordinul sutelor de μm (*silicon-on-insulator-SOI*)



Fig. 2. 23. Reprezentarea structurii de tip sandwich formată din Si cristalin, SiO_2 și un substrat izolator din Si.

Ghidurile pot fi fabricate simetric prin oxidarea termică a suprafeței. Stratul de SiO_2 îngropat având un indice de refracție de 1,46 care este mai mic decât al stratului de Si cristalin care are valoarea de 3,5 structura de tip sandwich produce ghidarea undelor luminoase.

Fabricarea ghidurilor de Si pe substrat izolator prin implantarea oxigenului. Cea mai răspândită metodă de fabricare a ghidurilor de Si este cea care utilizează separarea straturilor prin implantarea unui mare număr de ioni de oxigen în substratul de Si (*Separation by Implanted Oxygen-SIMOX*) [2.15]. Numărul total de specii de ioni implantați în substrat este caracterizat de *doza ionică*, care este numărul total de ioni ce trece printr-o suprafață de 1 cm^2 și se măsoară în ioni/cm^2 . În cazul procesului de fabricare de tip SIMOX doza ionică este de obicei mai mare decât 10^{18} cm^{-2} , iar la temperatura camerei este posibilă formarea unui superstrat nedorit de Si amorf în timpul procesului de implantare a oxigenului. Pentru a preveni acest fenomen, substratul de Si trebuie menținut la temperatura de aproximativ 600°C în timpul implantării.

Ionii de oxigen sunt implantați în substratul de Si cristalin la energii de 200 keV, acestea determinând adâncimea de pătrundere a SiO_2 și grosimea superstratului de Si. Evoluția profilului concentrației normalizate de oxigen, C este în funcție de adâncimea de la suprafața stratului de Si, x și este prezentată schematic în figura 2. 24.

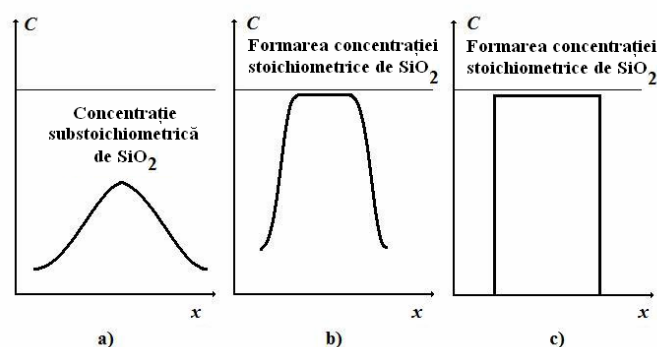


Fig. 2. 24 a)-c). Variația profilului concentrației de oxigen în timpul unui proces de tip SIMOX în cazul unor doze: a) mici, b) mari și c) după implantare și coacere timp de câteva ore la 1300°C .

Profilurile prezentate în figura 2. 24 caracterizează evoluția concentrației de oxigen în adâncime în timpul evoluției procesului. În cazul unor doze mici ($\sim 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) profilul poate fi descris de o funcție de tip Gauss (v. fig. 2. 13 a)). Ca urmare a creșterii timpului implantării și a dozei maximul concentrației ionilor de oxigen (O^+) se saturează până la o valoare limită corespunzătoare stoichiometriei SiO_2 (v. fig. 2. 13 b)). În urma implantării unui număr și mai mare de ioni de oxigen profilul începe să se aplatizeze, ceea ce conduce la formarea unui strat intern continuu de SiO_2 (v. fig. 2. 13 c)). După ce doza ionică devine mai mare decât 10^{18} cm^{-2} dispozitivul este călit timp de câteva ore la temperatura de

1300° C. În urma acestui procedeu se obține un strat de oxid stabil și de foarte bună calitate care este mult utilizat în microelectronică și are numeroase aplicații: la fabricarea circuitelor electrice și optice integrate, izolarea electrică, obținerea măștilor etc.

În urma depunerii (creșterii) stratului de SiO₂ pe o structură de tip SOI ghidul simetric de tip lespede se transformă într-unul asimetric. Pentru a se obține o ghidare optimă a luminii este necesar să se prevină pătrunderea câmpului electric în stratul de protecție (cladding). În cazul utilizării SiO₂ pe un ghid de Si cu dimensiunea de câțiva microni stratul de oxid are grosimea $> 0,4 \mu\text{m}$ [2.15].

O metodă foarte des utilizată pentru obținerea stratului de SiO₂ pe ghidurile de Si este *oxidarea termică* prin care se poate obține o suprafață netedă de foarte bună calitate. Procesele chimice care caracterizează oxidarea sunt:



în cazul oxidării uscate și



în cazul celei umede în care sunt utilizați vapori.

Aceste procese se desfășoară în cuptoare de cuarț caracterizate printr-un control riguros al atmosferei și al debitului de gaz. Temperatura la care se desfășoară procesul este cuprinsă între 750 și 1100° C.

Grosimea stratului de SiO₂, d_0 este dată de relația [2.15]:

$$2d_0/a = \left\{ 1 + \left[4b(t + \tau)/a^2 \right]^{1/2} \right\} - 1 \quad (2.20)$$

unde t reprezintă timpul de oxidare, iar a, b și τ sunt constante care caracterizează viteza de reacție a oxigenului pe suprafața de Si, difuzia moleculei de O₂. Aceste trei constante se determină experimental pentru anumite condiții de creștere. În cazul oxidării uscate la temperatura de 1000° C și o presiune de 10^5 N/m^2 valorile acestor parametri sunt: $a = 0,165 \mu\text{m}$, $b = 0,012 \mu\text{m}^2/\text{h}$ și $\tau = 0,37 \text{ h}$. În cazul unui timp $t \gg \tau$ și $t \gg a^2/4b$ procesul este limitat de difuzia oxigenului sau moleculelor de apă în stratul de oxid existent înainte ca reacția să aibă loc.

2.2.7. Ghiduri de undă în materiale organice

Materialele organice, prin proprietățile fizico-chimice pe care le posedă, cum ar fi: procesabilitate, versatilitate și calitate optică bună, au numeroase aplicații atât în domeniul opticii generale cât și în cel al telecomunicațiilor optice și al opticii neliniare. Aceste proprietăți pot fi controlate și modelate adecvat cu ajutorul tehnologiilor ingineriei moleculare [2.8], [2.9]. Astfel, polimerii polarizați au coeficienți optici neliniari de ordinul doi foarte mari și calitate optică bună în comparație cu alte materiale anorganice. De asemenea, polimerii care prezintă legături reticulare se caracterizează printr-o orientare stabilă a acestora în timp îndelungat.

Polimerii conjugați centrosimetrici, polimerii amorfii și cei orientați se caracterizează printr-o susceptibilitate de ordinul trei mare, ceea ce le conferă largi aplicații în studiul efectelor neliniare de ordinul trei.

Există mai multe procedee de fabricare a filmelor polimerice, și anume:

- metoda Langmuir-Blodgett* (prezentată schematic în figura 2. 25) pentru straturi de tip X, Z sau metoda de obținere a filmelor alternative,
- metoda epitaxială sau heteroepitaxială*,
- metoda de obținere a polimerilor polari*.

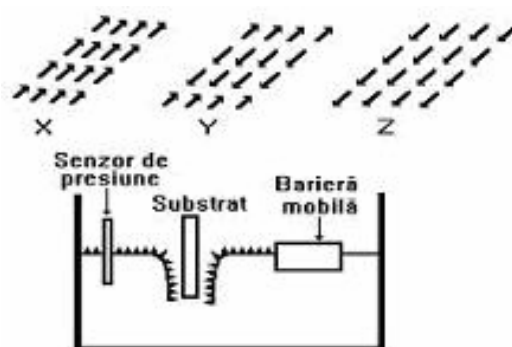


Fig. 2. 25. Metoda Langmuir-Blodgett de depunere a filmelor subțiri formate din trei tipuri de straturi X, Y, Z.

Pentru fabricarea ghidurilor planare de tip nervură cu numeroase aplicații în microelectronică sunt des utilizați fotopolimerii, ca de exemplu CICLOTENA™ foto bis-benzociclobutena-*BCB* 4024-40 datorită numărului redus de echipamente și de etape în procesul de producere precum și costului redus [2.16], [2.17]. Etapele mai importante în procesul de fabricare sunt (fig. 2. 26): a) depunerea unui strat fotosensibil de BCB pe un substrat din sticlă BK-7, b) iradierea materialului fotosensibil, peste care s-a aplicat masca cu radiații U. V., c) dezvoltarea și coacerea într-un cuptor.

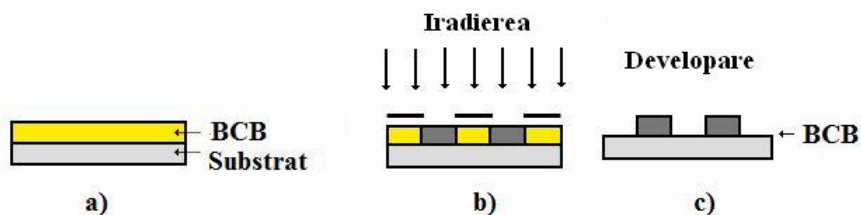


Fig. 2. 26. Etapele procesului de fabricare a ghidurilor polimerice de tip BCB.

După aceste etape structura este tăiată mecanic cu o lamă cu diamant până la dimensiunile dorite și apoi polizată cu ajutorul unei paste care conține diamant policristalin.

În ultimii ani au fost obținute filme cu cromofori neliniari de tip policarbonat amorf dopat cu AJL8 care prezintă o bună stabilitate termică la temperaturi ridicate [2.16], [2.17]. O astfel de structură are un coeficient electrooptic ridicat, $r_{33}=94$ pm/V la lungimea de undă 1300 nm, iar temperatura la care se degradează este 220 °C.

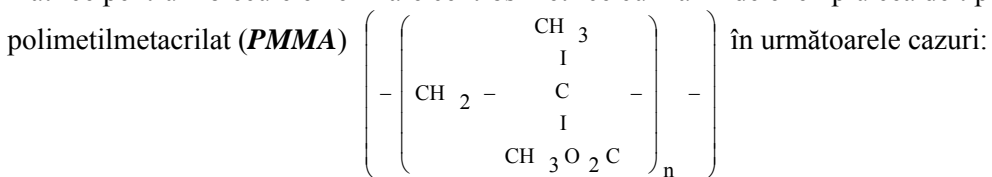
Cu ajutorul metodei de depunere Langmuir-Blodgett (v. fig. 2. 25) este posibil să se obțină filme centrosimetrice de tip Y, dar și necentrosimetrice de tip X sau Z [2.9].

Această metodă se aplică cu succes mai ales moleculelor amfifilice având extremități de tip hidrofob și hidrofil, care sunt încorporate în molecula necentrosimetrică.

Utilizând metoda Langmuir-Blodgett ordinea moleculară este menținută numai pe câteva straturi moleculare, în timp ce aplicațiile în optica ghidată ce depind de lungimea de undă la care se operează necesită grosimi de ordinul micronilor. De asemenea, filmele obținute prin această metodă conțin microcristalite care, împrăștiind lumina, le fac mai puțin aplicabile în optica ghidată. Deși au fost obținute filme necentrosimetrice de tip Y care se caracterizează prin coeficienți neliniari mari de ordinul pm/V, din cauza pierderilor relativ mari, 10 ÷ 40 dB/cm corespunzătoare lungimii de undă de operare 1064 nm, acestea nu pot fi aplicate în modulația electrooptică sau în conversia de frecvență.

Pentru a se depăși acest inconvenient se utilizează filme subțiri alternative formate din două straturi care conțin molecule diferite, care prezintă de obicei momente de dipol opuse [2.8].

Aplicațiile cele mai promițătoare în optica ghidată le au polimerii polari. În acest caz, polimerii amorfi care prezintă calități optice foarte bune sunt folosiți ca matrice pentru moleculele neliniare centrosimetrice cum ar fi de exemplu cea de tip polimetilmetacrilat (**PMMA**)



a) Sisteme formate din matricea gazdă și moleculele oaspete. În acest caz, moleculele active dizolvate în polimerul matrice se pot roti liber la temperatura de tranziție în stare sticloasă a polimerului.

b) Lanțuri (co)polimerice cu o singură bandă care conțin molecule active grefate pe lanțul polimeric.

c) Lanțuri polimerice principale care conțin molecule active inserate în lanțul polimeric.

d) Polimeri cu rețicule. În acest caz moleculele active centrosimetrice reacționează cu polimerul matrice dând naștere unei rețele tridimensionale stabile.

În toate cazurile polimerii dopați sunt încălziți până la temperatura de tranziție în stare sticloasă, iar moleculele active sunt orientate prin aplicarea câmpului electric pe filmele polimerice.

Metodele epitaxiale bazate pe evaporarea în vid înaintat sunt aplicate cu succes mai ales pentru fabricarea filmelor subțiri necentrosimetrice, cum ar fi de exemplu cele din polidiacetenă, caracterizate de coeficienți neliniari de ordinul doi foarte mari [2.8]. Această metodă poate fi utilizată și pentru fabricarea filmelor polimerice subțiri orientate (ordonate) din diacetenă [2.8]. Unul dintre inconvenientele acestei metode este legat de nepotrivirea contactului plan dintre substratul cristalin și straturile de molecule depuse.

Deși polarizarea prin efect corona este cel mai des folosită, există cazuri când se produc microcurenți care deteriorează local filmul. Pentru a evita aceste cazuri nedorite se plasează site metalice între anod și filmul polarizat, controlându-se în acest fel curentul de polarizare și de asemenea obținându-se o mai mare suprafață de film polarizat. Eficiența polarizării depinde de raportul $\mu E/kT$, unde μ este *momentul de dipol al moleculei*, E este câmpul de polarizare, iar T este temperatura.

Întrucât câmpul de polarizare este limitat superior de valoarea corespunzătoare distrugerii filmului polimeric, pentru mărirea eficienței de polarizare se selectează molecule cu moment dipolar mare. Stabilitatea termică și în timp a orientării momentelor de dipol induse este mai mare pentru polimeri care au o temperatură de tranziție în stare sticloasă mai mare.

Proprietățile microscopice care generează efectele electrooptice macroscopice sunt determinate de valorile ridicate ale momentului de dipol, μ și respectiv hiperpolarizabilității, β . Valorile ridicate ale momentului de dipol joacă un rol important în procesul de aliniere a moleculelor, iar hiperpolarizabilitatea microscopică este legată de susceptibilitatea neliniară de ordinul doi, $\chi^{(2)}$ prin relațiile [2.16]:

$$\chi_{zzz}^{(2)} = N\beta f(\omega) \langle \cos^3 \theta \rangle \quad (2.21)$$

și

$$\chi_{zxx}^{(2)} = N\beta f(\omega) \langle \cos \theta \rangle \langle \cos^2 \theta \rangle \quad (2.22)$$

în care: N reprezintă numărul de cromofori, $f(\omega)$ caracterizează atenuarea câmpului local din cauza cromoforului, iar termenii care conțin $\langle \cos \theta \rangle$ sunt parametri de ordine ce determină alinierea moleculelor. Susceptibilitățile neliniare de ordinul doi, $\chi_{zzz}^{(2)}$ și $\chi_{zxx}^{(2)}$ definesc coeficienții electrooptici r_{33} și r_{13} .

După fabricarea cromoforilor, pentru a mări efectul electrooptic trebuie fabricat un film care să conțină molecule aliniate, adică trebuie maximizat termenul $\langle \cos^3 \theta \rangle$. Inițial cromoforii sunt amestecați cu polimerul într-un solvent, iar apoi este dispusă pe un substrat, de exemplu Si amorf care nu prezintă proprietăți electrooptice. Pentru a orienta moleculele în film și a obține efectul electrooptic pe

întreaga structură, aceasta este încălzită până la temperatura de tranziție în stare sticloasă, iar apoi se polarizează cu ajutorul unui câmp electric care rotește momentele de dipol ale moleculelor și le aliniază paralel cu câmpul. Ulterior structura este răcită până la temperatura camerei, iar câmpul electric este suprimat.

Polarizarea poate fi făcută fie prin contact direct cu ajutorul electrozilor (*polarizare prin contact cu electrozi*) fie prin introducerea filmului într-o descărcare de tip corona (*polarizare prin efect corona*).

Metoda de polarizare prin contact. În acest caz, tensiunea se aplică direct pe două contacte metalice depuse pe suprafața filmului [2.16], [2.17]. Acest tip de polarizare este limitat de suprafața acoperită de electrozi, câmpurile obținute fiind mai mici decât cele obținute prin alte metode, permițând aplicarea unor tensiuni diferite pe aceeași structură. În acest mod, cele două brațe ale interferometrului Mach-Zehnder pot fi polarizate în mod diferit aplicând pe un braț o tensiune pozitivă și una negativă pe celălalt.

Metoda de polarizare prin efect corona. Această metodă este prezentată schematic în figura 2. 27 și constă în descărcarea electrică autoîntreținută prin scânteie datorită străpungerii parțiale a unui gaz dielectric [2.17].

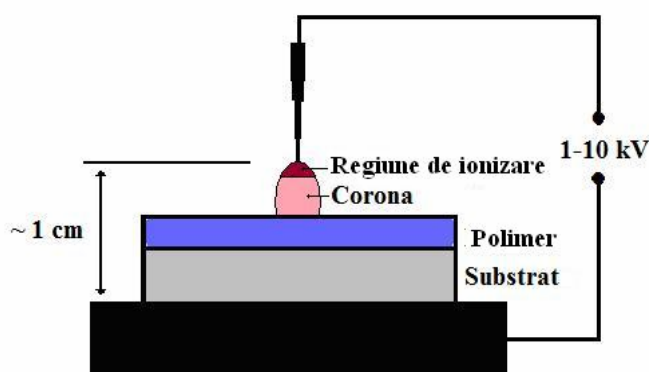


Fig. 2. 27. Prezentarea schematică a polarizării prin efect corona pentru alinierea cromoforilor în polimer.

În acest caz, tensiunea de ordinul kV este aplicată unui electrod metalic sub forma unui ac, pe al doilea electrod situat la distanța de ~ 1 cm de primul fiind deus substratul de Si cu polimer. Câmpul intens dintre ac și al doilea electrod ionizează moleculele mediului înconjurător accelerând ionii spre suprafața substratului. În urma depunerii ionilor pe suprafața filmului se obține un câmp electric puternic. Această metodă permite obținerea unor suprafețe de polarizare mari și uniforme. Pentru a împiedica străpungerea totală a mediului înconjurător, curentul care produce efectul corona trebuie monitorizat și limitat. De asemenea, trebuie evitată polarizarea în atmosferă de oxigen pentru că moleculele acestui gaz

se infiltrează în film distrugând moleculele de cromofor și micșorând efectul electrooptic. De aceea, se preferă polarizarea într-o atmosferă cu gaze inerte fără oxigen.

2.2.8. Fabricarea ghidurilor optice cu rețele Bragg

Ghidurile optice de undă cu rețele Bragg având perioade mai mici de 1 μm stau la baza fabricării filtrelor în sistemele de telecomunicații optice în care se utilizează demultiplexori, a laserelor integrate cu reacție distribuită etc. Există mai multe procedee de fabricare a rețelelor Bragg, metoda interferometrică fiind printre cele mai des utilizate. De asemenea, există mai multe metode de fabricare a ghidurilor optice de undă [2.5], [2.18].

În cazul unui ghid optic de undă fabricat în sticlă prin metoda schimbului ionic etapele procesului de fabricare sunt: 1) curățarea substratului, 2) depunerea stratului de aluminiu, 3) depunerea fotorezistului cu o grosime de 5 μm , 4) expunerea fotolitografică utilizând o mască și radiații UV, 5) dezvoltarea fotorezistului, 6) litografia aluminiului, 7) eliminarea fotorezistului, 8) schimbul ionic în sare topită care conține K^+ , la 450°C, timp de 50 min., 9) eliminarea măștii de aluminiu.

După producerea ghidului optic de undă substratul este tăiat, polizat la capete în vederea obținerii unui cuplaj cât mai bun cu alte componente optice integrate și apoi se trece la fabricarea rețelelor Bragg, care joacă rol de *oglinzi*.

În cazul ghidurilor fabricate în sticlă există trei metode mai importante de producere a rețelelor prin: 1) gravare, 2) depunere și 3) schimb ionic. Principalele etape parcurse în cazul gravării rețelelor utilizând metoda interferometrică cu expunerea fotorezistului (fig. 2. 28) sunt: a) depunerea fotorezistului, b) inscripția fotorezistului prin metode interferometrice, c) dezvoltarea fotorezistului și d) gravarea prin metoda chimică [2.18].

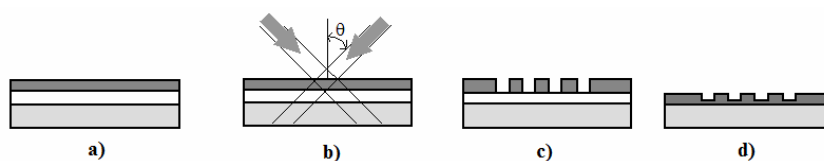


Fig. 2. 28. Etapele procesului de fabricare a ghidurilor cu rețele Bragg: a) depunerea fotorezistului, b) inscripția fotorezistului, c) dezvoltarea fotorezistului, d) gravarea chimică.

Pentru inscripția fotorezistului prin metoda interferometrică a fost utilizat un laser cu Ar cu lungimea de undă de $\lambda = 488 \text{ nm}$ și puterea de 1 mW, un telescop și o rețea de difracție, montajul experimental utilizat fiind prezentat în figura 2. 29.

Perioada rețelei Bragg care este inscripționată poate fi calculată cu ajutorul relației:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2.23)$$

în care: θ este unghiul de incidență, iar λ reprezintă lungimea de undă a laserului cu Ar. Ținând seama de relația (2.23) rezultă că domeniul de variație a perioadei rețelei Bragg este: $244 \text{ nm} \div \infty$. Procesul de dezvoltare a fost monitorizat în timp real cu ajutorul unui program de achiziție a datelor, LABVIEW (fig. 2. 30). Pentru aceasta s-a utilizat un optimetru care colectează radiațiile difractate de rețeaua de difracție din ordinul I.

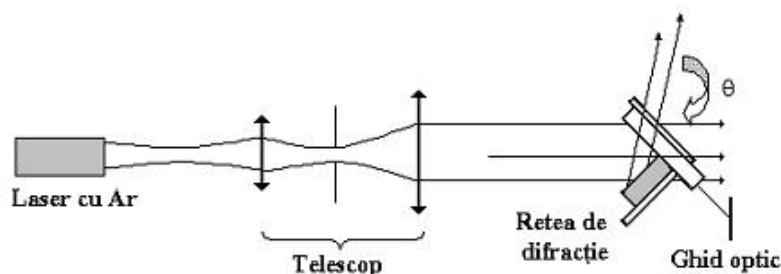


Fig. 2. 29. Montajul experimental utilizat pentru inscripția fotorezistului prin metoda interferometrică.

Procesul de monitorizare a dezvoltării cuprinde mai multe etape și trebuie oprit când puterea radiațiilor difractate de ordinul I devine constantă. Maximul ascuțit din figura 2. 29 se datorează schimbării automate a scalei optometrului.

Condițiile experimentale de dezvoltare au fost următoarele: puterea laserului: 1 mW, timpul de expunere: 2 min., concentrația soluției: 20% dezvoltator și 80% apă neionizată.

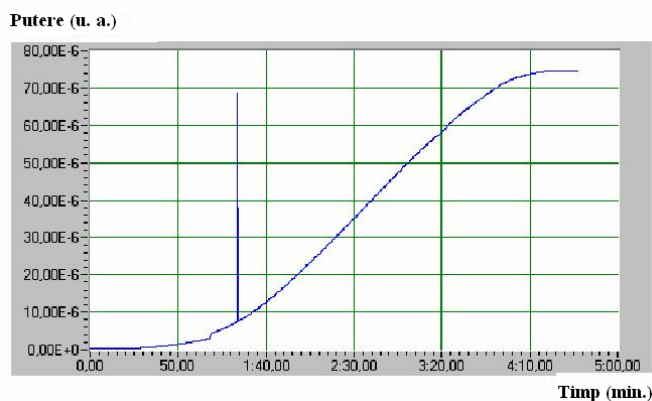


Fig. 2. 30. Monitorizarea procesului de dezvoltare cu ajutorul unui program LABVIEW.

Dacă puterea radiațiilor din ordinul I de difracție începe să scadă substratul a fost dezvoltat prea mult, iar dacă aceasta crește în continuare substratul nu a fost dezvoltat suficient. În ambele cazuri calitatea rețelelor obținute nu este bună.

După dezvoltarea fotorezistului în procesul de fabricare a fost măsurată perioada rețelei utilizând un laser cu He-Ne utilizând metoda deviației minime (fig. 2. 31).

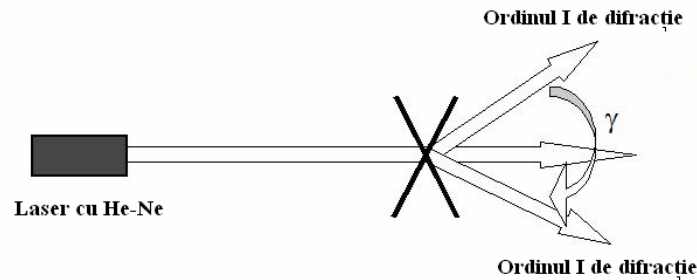


Fig. 2. 31. Montajul experimental utilizat pentru măsurarea perioadei rețelei prin metoda deviației minime.

Perioada rețelei este dată de relația:

$$\Lambda = \lambda / 2 \sin(\gamma / 4) \quad (2.24)$$

în care: γ este unghiul dintre radiațiile din ordinul I de difracție, iar λ reprezintă lungimea de undă a laserului cu He-Ne.

Relația (2.24) poate fi obținută din ecuația difracției

$$\Lambda(\sin \theta_d - \sin \theta_i) = k\lambda, \quad k \in Z \quad (2.25)$$

în care: θ_i reprezintă unghiul de incidență al radiațiilor incidente pe sticlă, iar θ_d este unghiul corespunzător fascicului difractat de ordinul I cu condiția ca θ_d să fie

minim ceea ce implică: $\frac{d\theta_d}{d\theta_i} = 0$ și $k = 1$ pentru fascicului difractat de ordinul I.

Ținând seama de relațiile (2.23) și (2.24) a fost făcută calibrarea unghiului θ corespunzător montajului experimental din figura 2. 28.

Ghidul fabricat pe baza procedurii prezentat anterior este monomod pentru radiația cu lungimea de undă de $1,5 \mu\text{m}$, spectrul fiind prezentat în figura 2. 32.

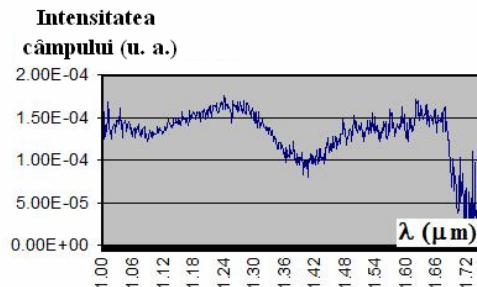


Fig. 2. 32. Spectrul optic al ghidului cu rețea Bragg.

Lungimea de undă corespunzătoare primului mod este de $1,7 \mu\text{m}$, iar cea corespunzătoare modului al doilea este de $1,4 \mu\text{m}$. Deci, în domeniul lungimilor de undă cuprins între $1,4 \mu\text{m}$ și $1,6 \mu\text{m}$, des utilizate în telecomunicațiile optice, propagarea este monomodală. Pentru lungimi de undă situate sub $1,4 \mu\text{m}$ sunt excitate alte două moduri în ghid.

Coeficientul de cuplaj al radiației incidente, k pe rețeaua Bragg fabricată în ghidul optic când vectorul de undă este perpendicular pe aceasta (fig. 2. 33) este dat de relația [2.18]:

$$k = \frac{i[1 - \cos(N\pi)] \sqrt{2(n_s^2 - n^2)}}{2N\lambda \sqrt{n_s^2 + n^2}} \quad (2.26)$$

în care: N este ordinul de difracție, n_s este indicele de refracție al substratului, iar $n = n_s + \delta n$ este indicele de refracție modulat al rețelei.

Considerând că $\delta n \ll n_s$ relația (2.26) poate fi aproximată sub forma:

$$k = \frac{i[1 - \cos(N\pi)] \delta n}{N\lambda} \quad (2.27)$$

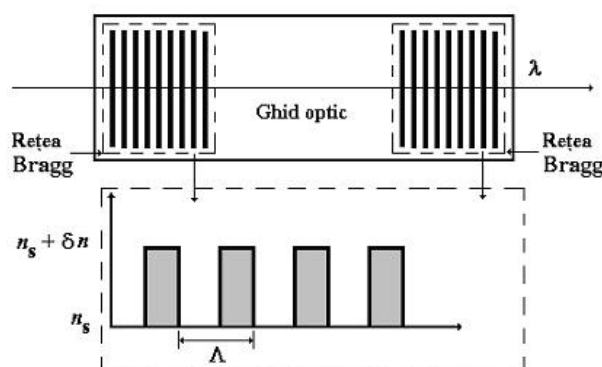


Fig. 2. 33. Reprezentarea schematică a unui ghid optic de undă cu rețea Bragg.

Dacă este satisfăcută condiția de difracție Bragg, reflectivitatea maximă a rețelei este dată de relația:

$$R_{\max} = \text{tgh}^2(kl), \quad (2.28)$$

în care: l reprezintă lungimea de interacțiune din rețea.

În cazul primului ordin de difracție, ($N=1$),

$$|k| = \frac{2}{\lambda} \delta n, \quad (2.29)$$

iar relația (2.28) devine:

$$R_{\max} = \text{tgh}^2\left(\frac{2\delta n}{\lambda} l\right). \quad (2.30)$$

Coeficientul de cuplaj (relația (2.26)) este maxim dacă este îndeplinită condiția:

$$\frac{dk}{dN} = 0 \quad (2.31)$$

În urma rezolvării ecuației transcendente (2.30) în cazul ghidului cu rețea Bragg prezentat anterior coeficientul de cuplaj devine maxim dacă $N = 0,742$, adică în cazul primului ordin de difracție ($N=1$).

2.2.9. Fabricarea cristalelor fotonice

Conceptul de *crystal fonic* a fost introdus în anul 1995 [2.19], iar primele astfel de cristale au fost fabricate în jurul anului 2000, în structuri de tip sandwich Si:SiO₂ [2.20]. Cristalele fotonice sunt structuri dielectrice periodice artificiale a căror constantă dielectrică este distribuită spațial pe baza anumitor simetrii și au dimensiuni cuprinse între 1 ÷ 1000 nm.

Pentru a descrie propagarea luminii într-un cristal fonic se poate face o analogie cu mișcarea electronilor și golurilor într-un semiconductor, cum ar fi de exemplu Si. *Densitatea de stări*, $D(\omega)$ ale câmpului de radiație dintr-un volum V în vid este dată de relația:

$$D(\omega) = \frac{\omega^2 V}{\pi^2 c^3} \quad (2.32)$$

în care: c este viteza luminii în vid. În cazul unui material omogen, în relația (2.32) c se înlocuiește cu $v = \frac{c}{n}$, n fiind indicele de refracție corespunzător

materialului (fig. 2. 34 a). Prin introducerea unui *defect* într-un material (cristal fonic) perfect se pot crea *stări fotonice localizate* caracterizate de forme și proprietăți determinate de natura defectului. În anumite condiții, un defect punctiform poate acționa ca o microcavitate, unul liniar ca un ghid de undă, iar altul planar ca o oglindă perfectă, putându-se astfel controla proprietățile luminii. În figura 2. 34 b) este prezentată densitatea de stări în cazul unui cristal fonic care are o bandă fonică interzisă și un mod localizat corespunzător defectului caracterizat de o densitate de stări de tipul funcției *delta* (Dirac).

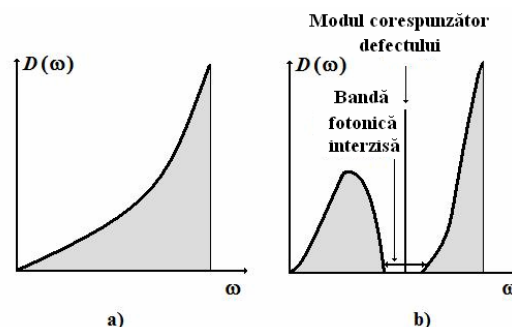


Fig. 2. 34. Reprezentarea schematică a densităților de stări ale unui câmp de radiație: a) în vid și b) în cazul unui cristal fonic.

Proprietățile optice ale atomilor și moleculelor depind foarte mult de densitatea de stări, $D(\omega)$; de exemplu, emisia unui foton dintr-o stare electronică excitată a unui atom sau molecule este proporțională cu $\omega D(\omega)$.

Variația funcției $D(\omega)$ determină modificarea proprietăților optice ale atomilor și moleculelor. Pentru modificarea proprietăților optice ale atomilor și moleculelor se pot utiliza fie microcavități optice fie cristale fotonice. Caracteristicile câmpului de radiație sunt modificate în cristalele fotonice, iar proprietățile optice ale atomilor și moleculelor introduse în cristal sunt alterate.

Cristalele fotonice sunt structuri regulate de materiale distribuite într-un ansamblu cu ordine determinată, având indici de refracție diferiți. Acestea pot fi clasificate în trei categorii: structură unidimensională, 1D (dielectrice multistratificate), structură bidimensională, 2D și structură tridimensională, 3D (fig. 2. 35). Astfel, cele două materiale notate cu A și B alternează, iar perioada spațială a ansamblului reprezintă *constantă rețelei*, aceasta fiind analoagă celei corespunzătoare cristalelor ordinare caracterizate de o dispunere regulată de atomi, molecule, ioni etc.

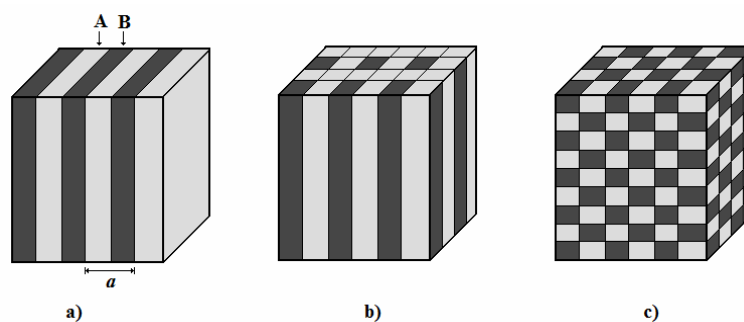


Fig. 2. 35 a)-c). Reprezentarea schematică a cristalelor fotonice cu structură: a) unidimensională (1D), b) bidimensională (2D), și c) tridimensională (3D).

În cazul cristalelor fotonice cu structură tridimensională (în care procesul de ghidare are loc după toate cele trei dimensiuni) fabricarea acestora este mai complicată. Propagarea luminii în aceste structuri se bazează pe confinarea bidimensională prin reflexie Bragg distribuită pe cristalul fonic în planul lateral de propagare al radiației electromagnetice și pe reflexia internă totală în plan vertical pentru a obține efectul de ghidare tridimensională.

Diferența fundamentală dintre cristalele ordinare și cele fotonice este determinată de constanta rețelei, aceasta fiind de câțiva \AA în cazul cristalelor ordinare și respectiv de ordinul lungimii de undă a undelor electromagnetice care se propagă în cristalul fonic (de exemplu, este de aproximativ $1 \mu\text{m}$ sau mai puțin în cazul radiațiilor vizibile și de aproximativ 1cm în cazul microundelor).

În cele mai multe cazuri, cristalul fonic constă dintr-o dispunere periodică de goluri gravate într-un strat de siliciu care este înconjurat de aer în ambele părți.

Forma circuitului este definită pe un substrat de polimetilmetacrilat (PMMA), iar etapele de fabricare sunt prezentate în figura 2. 36 [2.20].

La începutul procesului de fabricare a cristalului fonic se face oxidarea stratului de siliciu (fig. 2. 36 a)), apoi are loc atacul cu acid fluorhidric (HF) pentru a defini grosimea substratului de Si (fig. 2. 36 b)). Urmează depunerea unui substrat de PMMA și apoi litografia cu fascicul de electroni care definesc forma circuitului în PMMA (fig. 2. 36 c)-d)). În final se face gravarea cu fascicul de ioni care este controlată chimic și apoi atacul cu HF pentru a îndepărta stratul de SiO_2 (fig. 2. 36 e)-f)).

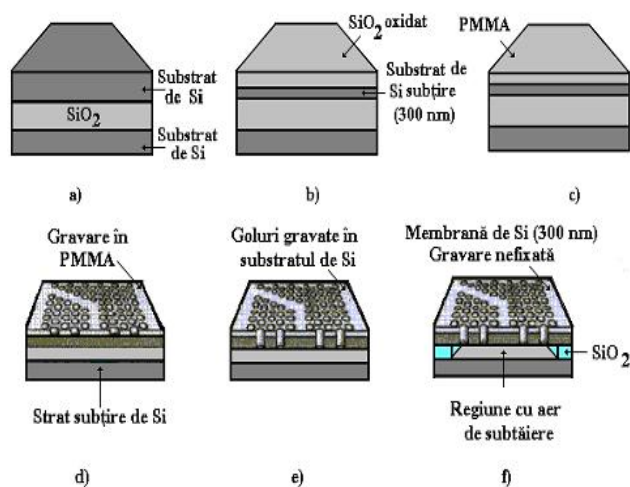


Fig. 2. 36. Etapele fabricării unui cristal fonic: a) oxidarea, b) atacul cu HF, c) depunerea PMMA, d) litografia cu fascicul de electroni, e) gravarea cu fascicul de ioni, f) atacul cu HF.

Pe baza tehnologiei prezentate anterior au fost obținute ghiduri cu lungimea de $500 \div 1000 \mu\text{m}$, drepte sau curbe sub unghiuri cuprinse între 60° și 90° . În cazul unei rețele pătrate constanta rețelei cristalului fonic de mai sus (spațiul dintre goluri) este $a \approx 500 \text{ nm}$, raza golului, $r \approx 200 \text{ nm}$, iar grosimea substratului de Si, $d = 280 \text{ nm}$.

O altă clasă de cristale fonice care au fost investigate mai ales în ultimii ani cu multiple aplicații în optoelectronică o constituie așa-numitele *cristale fonice de tip lespede* (fig. 2. 37).

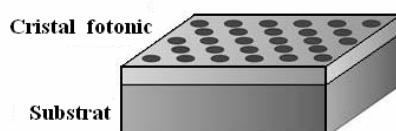


Fig. 2. 37. Reprezentarea schematică a unui cristal fonic de tip lespede.

De obicei acest tip de cristale fotonice este fabricat pe un substrat de semiconductor sau izolator utilizând metoda litografiei cu fascicule de electroni.

De asemenea, straturile monomoleculare fabricate din microsferă polimerice pot fi considerate cristale fotonice de tip lespede [2.21].

Imaginea unui ghid fabricat într-un cristal fonic cu fețe polizate, obținută prin scanare microscopică cu electroni, este prezentată în figura 2. 38.

Circuitele care au la bază cristalele fotonice și operează la lungimea de undă de 1550 nm pot ghida lumina și prin ghiduri de formă ascuțită având raza de curbură de ordinul lungimii de undă a radiației luminoase. Utilizarea cristalelor fotonice în fabricarea circuitelor optice integrate permite miniaturizarea acestora până la dimensiuni comparabile cu lungimea de undă a radiațiilor luminoase și de asemenea, implantarea pe același substrat a unui număr de componente optoelectronice care este cu patru până la cinci ordine de mărime mai mare decât cel actual, realizându-se astfel obiectivul opticii integrate.

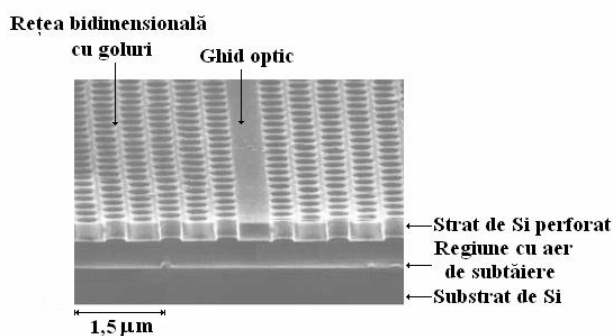


Fig. 2. 38. Imaginea unui ghid fabricat într-un cristal fonic cu fețe polizate, obținută prin scanare microscopică cu electroni.

Efectul de ghidare și numărul de moduri suportat de ghid se bazează pe relația de dispersie, adică pe structura benzii fotonice. Atât în rețelele pătrate cât și în cele triunghiulare se pot propaga moduri polarizate TE a căror frecvență normalizată este $a/\lambda = 0,35$, (λ fiind lungimea de undă a radiației) [2.21]. Introducând în cristalul fonic o linie de defecte prin eliminarea unei linii de goluri din rețeaua bidimensională se obține cel mai simplu ghid. Fotonii care au energia în interiorul benzii interzise se pot propaga numai de-a lungul acestei linii de defecte.

2.2.10. Realizarea măștilor

Definirea formei ghidului optic se face cu ajutorul măștilor. Realizarea practică a măștilor poate fi făcută prin mai multe metode.

Pentru realizarea unei măști de crom-nichel pe suport de sticlă se utilizează un dispozitiv de tip ELECTROMASK format dintr-o lampă cu radiații UV care iluminează o fantă cu deschidere variabilă în lățime (W) și lungime (L). Reglarea dimensiunilor fantei se face prin rotirea acesteia cu un anumit unghi θ (fig. 2. 39).

Imaginea fantei este reprodusă pe stratul de rășină fotosensibilă dispus pe suprafața măștii care se află pe o placă de sticlă, iar poziția acesteia este definită în plan de coordonatele (x,y) . În cazul unei măști la scara 1:10 pentru repetarea procesului de fotografiere dimensiunile plăcii de sticlă sunt: $12,7 \times 12,7 \text{ cm}^2$. Circuitul care urmează a fi reprodus se descompune în dreptunghiuri elementare.

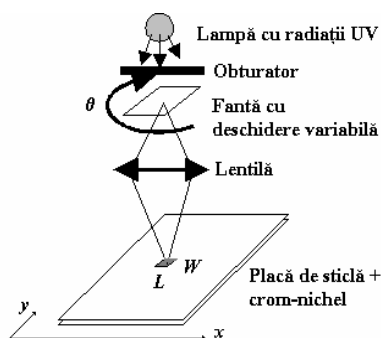


Fig. 2. 39. Reprezentarea schematică a dispozitivului de tip ELECTROMASK.

În cazul unui circuit simplu format din două ploturi reunite printr-o linie (fig. 2. 40 a)) descompunerea în dreptunghiuri elementare este prezentată în figura 2. 40 b).

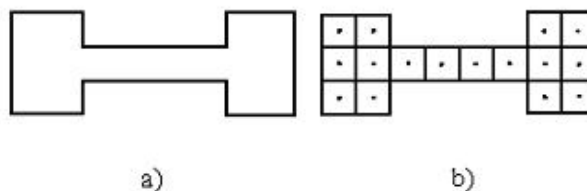


Fig. 2. 40. a) Reprezentarea schematică a unui circuit optic simplu și b) descompunerea acestuia în dreptunghiuri elementare.

Fiecare dreptunghi este definit de poziția sa (coordonatele (x,y)), de lățimea (W), lungimea (L) și respectiv orientarea sa (θ). Datele sunt introduse într-un fișier și apoi cu ajutorul unor programe este comandată: deplasarea substratului după axele (x,y) , deschiderea fantei cu o anumită lățime (W), lungime (L) și o anumită orientare (θ).

Toate datele x , y , L , W trebuie exprimate în zecimi de micron, fiind acceptate numai valori întregi. Circuitul este iradiat, după care este dezvoltat și apoi este gravat cromul.