

## Tehnici experimentale de modulare

Modularea experimentală a sistemelor optice și în particular a sistemelor laser este o tehnică complexă datorită caracteristicilor speciale ale acestor sisteme. Trebuie avut în vedere că radiația optică care este emisă sau absorbită de astfel de sisteme are o lungime de undă de ordinul 400-800 nm, corespunzându-i o frecvență de ordinul a  $10^{14}$  Hz. Timpul de răspuns al unor astfel de sisteme este în general foarte rapid. Emisia laserilor cu semiconductori în undă continuă depinde de ratele de emisie stimulată și recombinare a purtătorilor de sarcină în mediul activ al joncțiunii semiconductorului dar și de densitatea acestor purtători. În mod normal laserul se află într-o stare dinamică de echilibru unde procesele menționate mai sus sunt staționare, iar emisia este stabilă în timp ("CW laser"). În cazul în care există feedback optic ce provine de exemplu de la o oglindă sau rețea de difracție situată în calea fascicolului emis, atunci funcționarea laserului are o dinamică mult mai complexă ce depinde de nivelul de radiație injectată înapoi în mediul activ laser precum și de lungimea cavității extinse. Modularea laserului este realizată atunci când unul din parametrii sistemului diodă laser cu cavitare extinsă are o variație periodică în timp. Se pot diferenția mai multe tipuri de modulări. Pe de o parte se poate modula numai emisia optică, fără a perturba dinamica laserului. O astfel de modulare este des folosită în comunicațiile optice digitale unde semnalul ce urmează a fi transmis de către dioda laser modulează purtătoarea optică. Astfel, în locul unei emisii constante în timp se obține un tren de unde în care alternează două niveluri de emisie ce corespund valorii 0 și respectiv 1 în semnalul digital. De asemenea o astfel de modulare este utilă mai ales atunci când detecția radiației emise de laser se face cu un fotodetector ce lucrează în radio-frecvență. Pe de altă parte, se poate modula laserul astfel încât să îi fie afectată dinamica. Funcționarea laserului se modifică trecând în spațiul fazelor dintr-o stare temporal stabilă într-una instabilă. Depinzând de modulare, se pot obține o multitudine de stări dinamice caracterizate fie de oscilații periodice, haotice sau regimuri de oscilații intermediare între periodic și haotic. Prin modulare se modifică atât frecvența oscilațiilor neliniare dar și amplitudinea acestora. Un avantaj al modulării este reducerea dimensiunii fractale a traiectoriei laserului modulată în spațiul fazelor și posibilitatea unei sincronizări haotice totale mai bune între 2 laseri cuplați, dintre care unul este modulată.

## Tehnici experimentale de modulare electrică

În cadrul experimentului nostru sunt folosiți laseri Toshiba ce emit la 663 nm, cu puteri cuprinse între 5 și 45 mW. Cea mai simplă este modularea emisieii diodei laser, fără a-i fi modificată dinamica. Astfel, un semnal periodic cu o frecvență de pînă la 1 MHz se poate introduce ca input în driver-ul diodei laser încît emisia să fie sincronizată cu acest semnal, ca în Fig. 5.1. Driverul pentru dioda laser este fabricat de ILX Lightwave, și are electronică specializată pentru stabilizarea curentului de ieșire cu o precizie mai bună de 0.1%.

O tehnică de modulare care are ca scop modificarea dinamicii diodei laser este injecția unui semnal electric de înaltă frecvență în mediul activ laser prin suprapunere peste curentul continuu (dc) nominal de injecție al driverului diodei [29]. Se poate folosi un generator de semnal de 5 GHz împreună cu un adaptor în T (bias Tee, model ZFBT-6G+) ca în Fig. 5.2. Astfel, peste curentul de 50-100 mA dc prin care se alimentează dioda laser se adaugă un curent RF de ordinul mA, cu o frecvență de pînă la

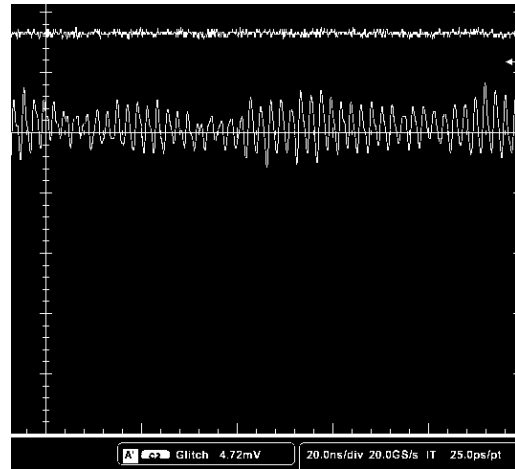


Fig 5.1. Modularea emisieii laser

5 GHz. Modularea curentului de injecție la frecvențe RF combinată cu un feedback optic obținut într-o cavitate externă are un efect puternic asupra oscilațiilor emisieii laser, așa cum rezultă din simulări. În practică se pot controla atât frecvența cât și amplitudinea oscilațiilor neliniare ale laserului, prin modificarea frecvenței curentului de modulare, începînd de la cîțiva MHz. Dioda laser este termostatăă cu un controler și cu o montură dedicată care permite stabilizarea temperaturii joncțiunii cu o precizie de 0.1 grade. În realizarea cavității externe fascicolul diodei laser este focalizat cu o lentilă cu o distanță focală de 5 mm. De asemenea, dioda este montată pe un stativ mecanic care se

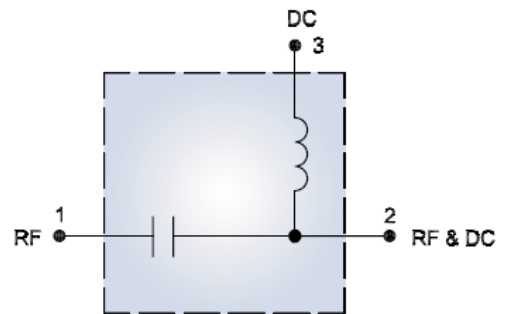
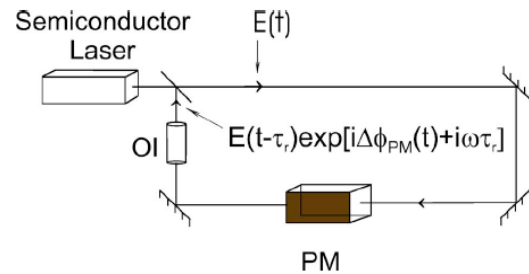


Fig 5.2. Însurarea a două semnale unul DC și celălalt de radio frecvență RF.

poate deplasa micrometric pe cele 3 axe de coordonate. Sistemul se află poziționat pe o masă optică Thorlabs dotată cu un sistem pneumatic care oferă o bună stabilitate mecanică și reduce vibrațiile externe.

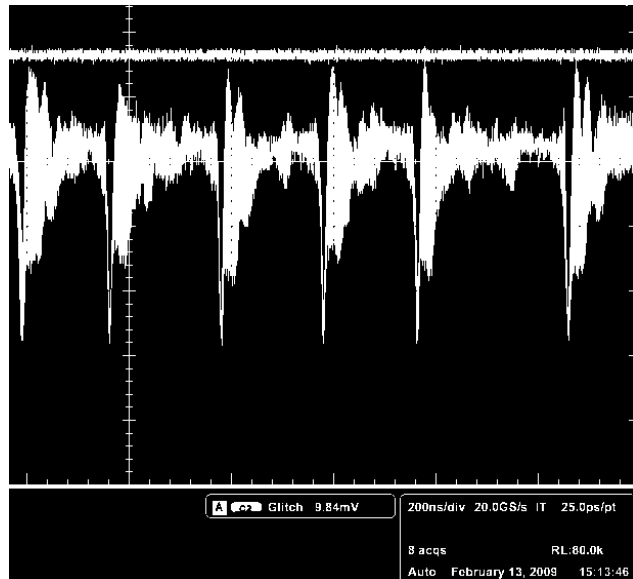
### Tehnici experimentale de modulare optică

Modulararea optică a unui laser cu semiconductor cu cavitate extinsă este în principiu mai complicată deoarece acționează asupra fazei luminii emise de laser, v. Fig. 5.3. Prin folosirea unui modulator electro-optic a cărui funcționare se bazează pe modificarea proprietăților optice ale



**Fig 5.3.** Dispozitiv experimental cu un modulator de fază PM, un izolator optic OI un “beam splitter” și 3 oglinzi.

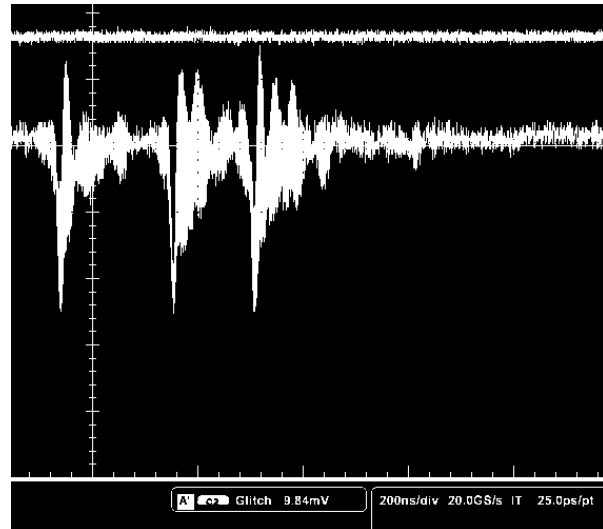
unui cristal neliniar alcătuit din  $\text{LiNbO}_3$  sau KDP, la aplicarea unui potențial RF de înaltă tensiune, faza vectorului câmp electric asociat luminii din cavitate se modifică cu un factor proporțional cu faza modulatorului,  $\Omega_m \cdot t$  [30-31]. Este de asemenea posibilă folosirea unui modulator electro-optic ce produce modularea intensității luminoase. În acest caz, amplitudinea vectorului câmp electric este variată în timp. Această tehnică este însă probabil mai puțin eficientă, deși în principiu poate avea un oarecare efect asupra dinamicii laserului datorită variațiilor în feedbackul optic. Un modulator optic ce poate fi înglobat în sistem este de tipul celor fabricate de New Focus sau ThorLabs, cu frecvențe de modulare între 1 MHz și 1 GHz. Pentru asigurarea unui cuplaj optim între feedback și mediul activ laser este utilă introducerea în cavitatea



**Fig. 5.4.** Trenuri de oscilații haotice în emisia laserului.

externă a unui izolator optic spațial ce permite propagarea unidimensională a fascicolului laser. De asemenea, un fotodetector ultra-rapid cu o bandă largă de funcționare de 5-12 GHz trebuie folosit pentru detectarea și măsurarea oscilațiilor rapide ale câmpului electric, de ordinul pico-secundelor. Un osciloscop Tektronix ultra-performant DPO7254 cu bandă largă de 2.5 GHz și cu o viteză de achiziție de 40 Gsample/s pe canal a fost achiziționat și este dedicat pentru astfel de măsurători.

În Fig. 5.4 sunt arătate oscilațiile “low frequency fluctuations” (sau LFF) ale laserului cu cavitate externă și feedback optic moderat, la un curent  $I=51$  mA, apropiat de cel de prag. Se disting clar trenurile periodice ce se succed la intervale de 100-300 ns în interiorul cărora se observă oscilații rapide de ordinul ps. Fiecare tren de oscilații este urmat de o cădere accentuată în putere, după care emisia se restabilește la nivelul inițial. În Fig. 5.5 se distinge trecerea sistemului laser de la un regim haotic la altul, caracterizată prin oscilații



**Fig 5.5.** Dinamica neliniară cu comutare între 2 regimuri diferite de haos.

cu amplitudini diferite. Temperatura joncțiunii este de 20°C pentru emisia din Fig. 5.1 și de 21°C pentru cea din Fig. 5.4. Un analizor de spectru optic de tipul WA-1100/7600 produs de EXFO Wavemeter, cu o rezoluție de 0.001 nm și dotat cu interfață pentru pc va fi folosit pentru monitorizarea lungimii de undă emise  $\lambda_L$ . Este bine cunoscut că o dată cu variația temperaturii apar salturi ale  $\lambda_L$  pe modurile cavității externe.

### **Tehnici experimentale de modulare mecanică**

O altă tehnică de modulare a sistemului de diodă laser cu cavitate extinsă este bazată pe variația rapidă și periodică a lungimii cavității prin plasarea rețelei de difracție pe un element piezo electric ce vibrează cu o frecvență ridicată, de pînă la cîteva sute de kHz. Dinamica laserului este astfel afectată prin modificarea periodică a drumului optic al radiației [32]. Componenta de bază a acestei tehnici de modulare este o celulă de tip

piezo-transducer alimentată de la un generator ultrasonic de putere. Prin controlul frecvenței celulei piezo se realizează o ajustare a ratei de variație a drumului optic din cavitatea externă. Faptul ca modificări microscopice ale lungimii cavității produc schimbări în dinamica laserului este demonstrat de oscilațiile sistemului arătate în figurile 5.1 și 5.4. Diferența de temperatură de un singur grad celsius poate produce deplasări microscopice în lungimea mediului activ laser ca urmare a dilatării termice a acestuia.

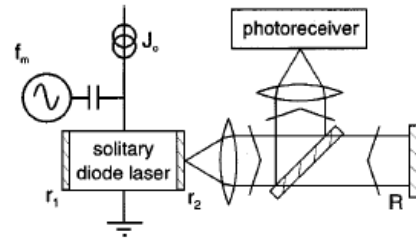
### **Tehnici experimentale de modulare pentru doi laseri cuplați**

Pentru cuplarea a 2 laseri identici cu semiconductori sunt introduse 2 beam splittere în cavitățile extinse ale acestor laseri. Acestea au rolul de a transmite o fracțiune (de ordinul a 1-10 %) din intensitatea luminoasă ce se propagă în prima cavitate în interiorul celei de-a doua cavități. Se obține o configurație de tip “master-slave”, în care unul din laseri “conduce” din punct de vedere dinamic cel de-al doilea laser [33]. Astfel, laserul “slave” primește feedback optic de la laserul “master”. Pentru un anumit nivel al feedbackului se poate realiza o sincronizare totală a traiectoriilor celor 2 laseri în spațiul fazelor, cu condiția ca parametrii de funcționare a acestora precum temperatura, curentul prin joncțiune și lungimea cavității să fie apropiați ca valoare în limita a 5-10%. Ambii laseri sunt operați la un curent foarte apropiat de pragul emisieii laser.

Modularea laserului master prin metodele menționate mai sus duce la controlul haosului în acest laser și implicit în laserul slave, prin feedbackul optic. În funcție de valoarea feedbackului dintre acești doi laseri, sincronizarea lor poate fi totală sau numai în fază. Astfel, cel de-al doilea laser, slave, este practic modulată de haosul laserului master. În cazul folosirii unui izolator optic, schema de cuplaj și deci de control este unidirecțională, de la master la slave. Este interesant de analizat dinamica celor doi laseri cuplați când feedbackul optic este bidirecțional. În acest caz laserii se influențează reciproc, fapt ce poate duce la observarea de “bătăi” ale oscilațiilor haotice.

## Analiza comparativa a datelor din literatura

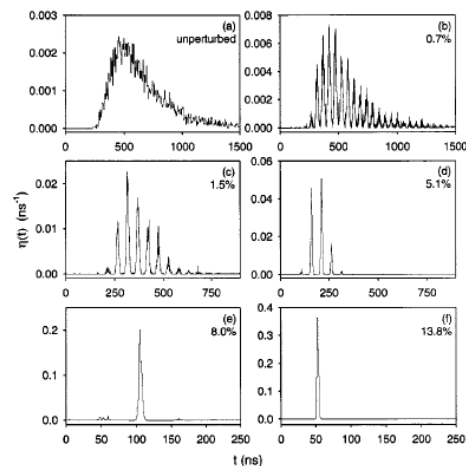
Tehnicile de modulare a laserilor haotici in general depind de frecventa oscilatiilor de relaxare din mediul activ laser sau din cavitatea laser. Astfel, de exemplu, laserii cu mediu activ corp solid precum Nd:YAG oscileaza haotic la frecvente de circa 50-200 kHz pentru feedback slab de 1-5 %, in timp ce pentru laserii cu semiconductori frecvența este de ordinul sutelor



**Figura 2.1.** Cavitate extinsa cu dioda laser haotica si modulator sinusoidal, din ref [1].

de MHz sau chiar GHz. Astfel modularea acestora cit si sincronizarea haosului in laseri cu solid se realizeaza mult mai simplu, in timp ce controlul haosului in laserii cu semiconductori este mai complicata. Laserii cu corp solid sunt exemplificati aici datorita raspindirii lor pe

scara larga in cercetare. Comparati cu laserii cu semiconductori laserii cu corp solid au lungimea cavitatii cu cel puțin doua ordine de marime mai mare: zeci de centimetri fata de zeci sau sute de micrometri ai unei diode laser. De asemenea, o alta caracteristica ce defineste oscilatiile de relaxare intr-un sistem laser cu feedback este timpul de relaxare a starilor metastabile care sunt dezexcitate simultan prin emisie stimulata. Daca la un laser cu corp solid acesta este de ordinul a 100  $\mu$ s, la laserii cu semiconductori este sub 1 ns. Astfel, tehnicile de modulare la laserii cu semiconductori pot utiliza frecvente de cel citiva MHz, insa cele



**Figura 2.2.** Efectul modularii curentului asupra unei diode laser haotice cu cavitate extinsa, din ref [1]: a) fara modulare, cu modularea in amplitudine de 0.7% din nivelul de curent DC in b) de 1.5% in c) de 5.1% in d) , de 8% in e) si 13.8 % in f).

care au un efect pronuntat asupra dinamicii neliniare sunt de ordinul sutelor de MHz pina la GHz. In cazul nostru interesul pentru tehnicile de modulare si de control a haosului sunt legate de distributia caderilor de putere din emisia laserului (LFFs), lungimea temporală a acestor caderi precum si sincronizarea a doi laseri haoticin dintre care unul este controlat prin aceste tehnici de modulare.

**Modulare in curent.** Printre tehnicile de control a haosului dintr-un sistem laser cu semiconductor cu cavitare extinsa, cea mai la indemina este modularea in curent a diodei laser. Un astfel de cuplaj a fost realizat de *Sukow et al* [1] care a folosit o dioda laser de tipul Spectra Diode, model SDL-5401-G1, cu emisie la 789 nm si current de prag de 17 mA. Dioda este montata intr-o cavitare extinsa cu o lungime de 71 cm si este stabilizata in temperatura, ca in Figura 2.1. Un modulator de current Tektronix model SG503

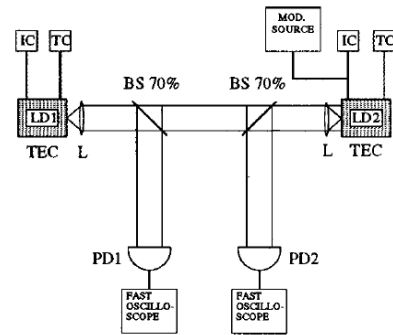
alimenteaza dioda cu un semnal sinusoidal de inalta frecventa RF prin intermediul unui bias tee model ZFBT-6GW. Acesta are ca output suma semnalelor RF de la generator si DC de la sursa de alimentare a diodei laser. Efectul modularii este prezentat in Figura 2.2. La o

frecventa a modularii de 30 MHz, la cresterea intensitatii curentului de modulare de la valori de 0.7 % pina la 13.8 % raportat la nivelul curentului DC se observa clar cum caderile de putere LFFs ale emisieii laserului devin periodice, toate cu aceeasi lungime temporală fie de 100 ns in cazul unie modulari de 8% sau de 50 ns pentru 13.8 %.

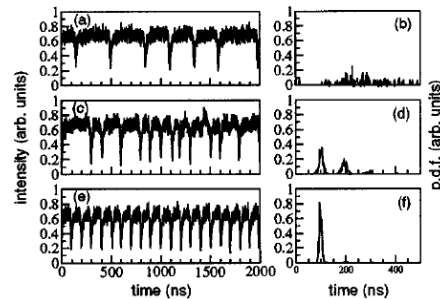
In aceste conditii, laserul continua sa aibe oscilatii de relaxare care sunt aproximativ periodice inasa intre doua astfel de caderi care se repeta la intervale regulate cind laserul este modulat, variatia in timp a emisieii este tot haotica. Practic laserul functioneaza intr-un regim haotic controlat, dimensionalitatea haosului scazind dramatic in acest regim de “control”. Ecuatiile sistenului laser cu cavitare extinsa si modulator care descriu acest fenomen sunt binecunoscutele ecuatii introduse de Lang si Kobayashi:

$$\frac{dE}{dt} = (1 + i\alpha)NE + \kappa e^{-i\Omega_o \theta_c} E(\tilde{t} - \theta_c)$$

$$T \frac{dN}{dt} = [P_o + P' \sin(\Omega_m \tilde{t})] - N - (1 + 2N)|E|^2$$



**Figura 2.3.** Cuplaj a doi laseri (LD1 si LD2) haotici identici cu cavitare extinsa dintre care LD2 este modulat, din ref [1]. Semnalele sunt culese de doi photodetectori PD1. si PD2



**Figura 2.4.** Controlul caderilor de putere in laserul modulat in curent, din ref [2]: a) fara modulare, c) si e) cu modulare de 0.23 si 0.30 mA. Histogramele caderilor de putere sunt date in b) , d) si e)

unde variabilele  $E(t)$  reprezinta vectorul cimp electric,  $N(t)$  este densitatea de purtatori de sarcina, iar  $\Omega_m = \omega_m \tau_p$  este frecventa modulatorului, si  $\tau_p$  timpul de viata al fotonilor.

*Buldu et al* [1] generalizeaza aceasta tehnica folosind doua diode laser haotice identice cu cavitate extinsa care sunt cuplate, sincronizate in timp si controlate prin modularea in curent doar a uneia, ca in Figura 2.3. Diodele folosite sunt de tipul index-guided AlGaInP, Roithner RLT6505G si emit la 657 nm. Laserii LD1 si LD 2 sunt alimentati la 17,8 respectiv 17,7 A. Aceste valori corespund curentului de prag al emisiei laser care datorita feedbackului optic este redus cu 1,5-2 % fata de cazul functionarii fara feedback. Un semnal sinusoidal cu o frecventa de 10 MHz obtinut de la un generator de semnal Agilent este introdus in LD2. Prin cresterea amplitudinii de modulare la o frecventa constanta se observa cum caderile de putere LFFs devin regulate in laserul modulat LD2, iar apoi si in LD1 datorita functionarii acestuia in regim de sincronizare. Periodicitatea cu care LFFs au loc este direct afectata de amplitudinea modularii, dupa cum se observa in Figura 2.4. Daca in a) caderile de putere sunt aleatoare, situatie conturata de reprezentarea pe histograma a acestora in b) in functie de durata dintre doua caderi consecutive, in c) si respectiv e), caderile se indeselesc si devin mult mai regulate, odata cu cresterea amplitudinii de la 0.23 la 0.30 mA. O tehnica matematica simpla de evaluare a modificarilor care apar in caderile de putere ca urmare a modularii parametrilor laserului este bazata fie pe o statistica simpla a acestora in functie de probabilitatea cu care sunt inregistrate [3]

$$PDF = (S_{max} - S) / S_{max}$$

unde  $S_{max}$  este distributia plata, atunci cind numarul total  $N$  de caderi de putere in emisia laserului sunt repartizate uniform in  $M$  coloane ale unei histograme,  $p_k = N_k / N$  este probabilitatea de a umple o coloana din histogramea cu  $N_k$  evenimente din totalul  $N$ , iar  $S$  este entropia Shannon:

$$S = - \sum_{k=1}^M p_k \ln(p_k).$$

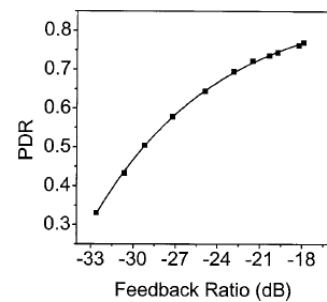
Astfel, cind toate caderile de putere

sunt similare, adica au aceeasi durata PDF=1, pe cind

atunci cind sunt relativ uniform distribuite in histograme si total necorelate PDF=0.

O alta caracterizare se poate face prin raportul de caderi in amplitudine [4]

$$PDR = \frac{\langle A \rangle}{\langle P_{max} \rangle} = 1 - \frac{\langle P_{min} \rangle}{\langle P_{max} \rangle}$$



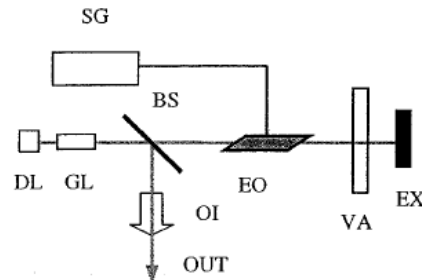
**Figura 2.5.** PDR in functie de feedbackul optic in cavitatea extinsa a laserului, din ref [4]



unde  $\langle P_{min} \rangle$  si  $\langle P_{max} \rangle$  sunt mediile valorilor minime sau maxime ale amplitudinilor emisiei laser. Astfel, amplitudinea unei singure caderi de putere este data de  $A = P_{max} - P_{min}$ . O reprezentare din [4] este aratata in Figura 2.5. unde PDR variaza in functie de feedbackul optic obtinut de la retea de difractie din cavitatea extinsa a laserului. Crescind feedbackul optic la valori mari, caderile de emisie devin din ce in ce mai mici in amplitudine astfel ca  $\langle P_{min} \rangle$  tinde spre  $\langle P_{max} \rangle$  iar laserul incepe oarecum sa se stabilizeze.

### Modulare electro-optica.

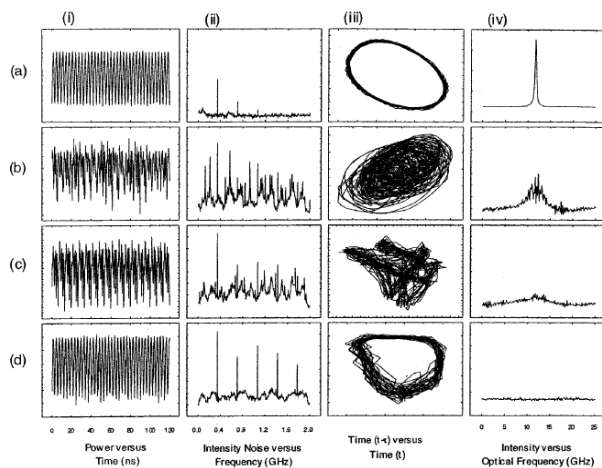
Modulare electro-optica este mai sofisticata in sensul ca functionarea unui modulator de acest tip este mai pretentioasa. Modulatorul este inserat in



**Figura 2.6.** Modulare electro-optica (EO) a unei diode laser cu cavitate extinsa, din ref [3]

cavitatea optica si aliniat cu fascicolul laser. Functionarea lui se bazeaza pe efectul nelinier al

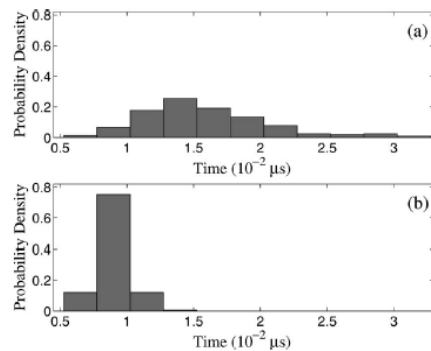
unui cristal care atunci cind este polarizat la o tensiune inalta de ordinul sutelor sau miilor de volti drumul optic al radiatiei care strabate cristalul este modificat. Timpul total de propagare al fascicolului in cavitatea extinsa este facut sa varieze inducand stari diferite in dinamica laserului. Un astfel de dispozitiv experimental este prezentat in Figura 2.6. [5]. O dioda de 50 mW de tipul SDL (quantum-well index-guided) care emite la 850 nm este



**Figura 2.7.** Emisia in functie de modularea electro-optica a fascicolului din cavitatea extinsa a laserului, pentru niveluri de putere diferite in a), b), c) si d), din ref [5]

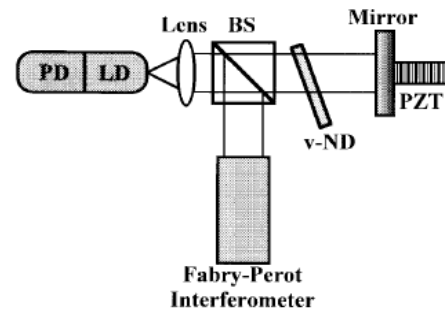
inserata intr-o cavitate externa cu o lungime de 31.7 cm. Curentul de prag al laserului solitar este de 25 mA si redus la 20 mA in prezenta feedbackului. In Figura 2.7 dioda este modulata la o frecventa de 292 MHz, cu puteri diferite, incepind de la -5 dbm in a), la 0 dBm in b), 5 dBm in c) si 13 dBm in d). Emisia optica din iv) trece din monomode in a), in multimode in b), se observa apoi o largire a spectrului de emisie in c) si se transforma intr-un spectru cu zgomot in d). In spatial fazelor atractorul traiectoriei aratata in iii) a) este o elipsa, dupa care devina neregulata in b) si c) si haotica in d). Aceasta varietate de stari dinamice este indusa

de modularea intensitatii fascicolului din cavitate la o frecventa constanta. In cazul in care este modificata frecventa de modulare, de ex. intre 400 MHz si 2 GHz, se pot obtine de asemenea LFFs corelate cu aceasta frecventa de modulare precum si zone periodice sau stabile. Pentru oscilatiile periodice din Figura 2.7. a) si b) iii), dinamica este data de competitia dintre semnalul periodic al modulatorului si modurile de oscilatie ale cavitatii externe. Intre regimurile caracterizate prin controlul LFFs de catre modulator si modularea in frecventa de tip FM, exista o regiune ingusta in care laserul este stabilizat si are o dinamica periodica. O comportare asemanatoare a fost observata in simulari ale functionarii unei diode laser in cavitate extinsa modulata electrooptic, realizate de *Ticos et al* [3]. Aici statistica modificarilor induse de modulator in lungimea temporală a caderilor de putere este demonstrata prin reprezentarea intr-o histograma, ca in Figura 2.8. Cind modulatorul este setat pe 1.97 GHz se observa pentru anumiti parametri ai sistemului laser cum aproape toate caderile de putere se incadreaza in intervalul 5-13 ns in Figura 2.8.b, in timp ce in lipsa modularii acestea au lungimi de 5 pina la 40 ns in Figura 2.8.a.



**Figura 2.8.** PDF in functie de modularea electro-optica a fascicolului din cavitatea a laserului: a) fara modulare, b) cu modulare la 1.97 GHz, din ref [3]

**Modularea mecanica a cavitatii.** O alta metoda de control mai putin raspindita este realizata prin modificarea rapida a lungimii cavitatii extinse a laserului. Aceasta modificare poate fi o variatie micrometrica a cavitatii cu o anumita periodicitate in timp sau pur si simplu o modificare rapida solitara [6,7]. Pentru astfel de miscari mecanice extreme de fine insa foarte rapide se folosesc cellule piezoelectrice care pot vibra cu frecventa de pina la



**Figura 2.9.** Modularea piezo-electrica a lungimii cavitatii extinse a laserului, din ref [6]

citeva sute de MHz la aplicarea unei tensiuni inalte pe cristalul piezo. Pe astfel de dispozitive piezo se poate monta etans retea de difractie care alcatuieste cavitatea extinsa a laserului. La pornirea celulei piezo drumul optic al radiatiei variaza proportional cu miscarea periodica micrometrica a retelei, sufficient cit sa aibe un efect asupra dinamicii mediului active laser si

sa influenteze emisia optica. O realizare experimentală folosind această tehnică de control a dinamicii laserului este prezentată în Figura 2.9 și a fost realizată de *Ikuma et al* [6]. O dioda laser Hitachi HL7801E ce emite 5mW la 780 nm este stabilizată în temperatură și introdusă într-o caviată externă a cărei lungime poate fi modificată de celula piezo cu citiva micrometri, depinzând de tensiunea aplicată. Cu ajutorul unui beam-splitter o mică fracțiune (~2%) din fascicul este trimisă la un interferometru Fabry-Perot pentru a monitoriza schimbările din spectrul optic. Emisia laser în funcție de lungimea cavității este arată în Figura 2.10. Se vede clar cum puterea oscilează și trece prin maxime și minime consecutive atunci când lungimea cavității variază cu valori de ordinul zecilor de micrometri. Un experiment asemănător este cel din [7] unde un laser DFB este stabilizat prin metoda piezoelectrică. Laserul trece printr-o bifurcație de tip Hopf când faza cimpului optic ce depinde de drumul optic din cavitate atinge o anumită valoare și intră în regimul de oscilații de relaxare. Prin variația lungimii cavității faza cimpului optic se schimbă și stările de funcționare instabile devin stabilizate.

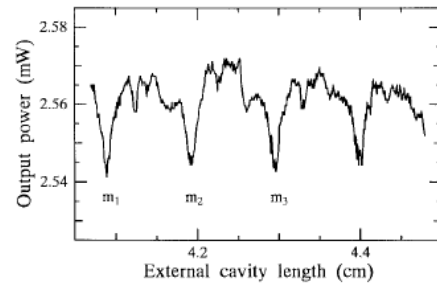


Figura 2.10. Puterea emisă în funcție de lungimea cavității extinse a laserului, din ref [6].