

Produkto de ultrarapidaj laseraj impulsoj

Enkonduko

La kapablo studi, produkti kaj regi pli kaj pli rapidajn eventojn estas ĉiama deziro de la homo. Longtempe la fulmo estis konsiderata kiel la plej rapida fenomeno observebla. Malgraŭ tio, ĝis mezo de la okdeka jarcento oni ne povis taksu kiom rapida ĝi estas. Enfakte eĉ longtempe post la fino de la mezepoko helpe de mekanikaj maŝinoj oni nur povis mezuri kelk-sekundajn tempintervalojn. Aperoj de la elektronikaj cirkvitoj ebligis mezuron de pli kurtaj tempintervaloj. Danke al ili oni sukcesis mezuri dekonojn kaj pli poste milonojn de la sekundo. Kun progreso de la elektronikaj aparatoj surbaze de vakuaĵaj tuboj oni kreis elektrajn impulsojn kiuj daŭris nur kelkajn mikrosekundojn (10^{-6} s) kaj uzis ilin por mezuri rapidecon de eventoj. Malgraŭ tiu progreso ankoraŭ ne eblis studi vivdaŭron de la fulmo. Enfakte antaŭ la komenco de la dudeka jarcento oni nur lernis ke elektraj sparkoj daŭras malpli longe ol 10^{-8} sekundoj. Drasta evoluo en la elektroniko okazis kiam en 1948 duonkonduktantaj transistoroj inventiĝis. Helpe de ili eblis krei pli kaj pli kurtajn elektronikajn signalojn kaj uzante ilin studi pli kaj pli rapidajn eventojn. Nuntempaj elektronikaj osciloskopoj povas mezuri signalojn kiuj daŭras kelkcentajn nanosekundojn (10^{-9} s). En ili oni uzas baskulŝaltadon de transistoroj sed pro kvantumaj limoj konvenciaj duonkonduktantaj transistoroj ne povas baskulŝalti pli rapide ol nanosekundo. Feliĉe helpe de laseroj oni povas transpasi ĉi tiun limon. Hodiaŭ danke al laseroj eblas studi eventojn kies daŭroj ne estas pli grandaj ol femtosekundo (10^{-15} s). Sed kiom longa estas unu femtosekundo? La tabelo unu provas klarigi tion.

1/30 sekundoj	La necesa tempo por ke la homaj okuloj reagu al lumŝanĝiĝo. Projekti unuopajn kadrojn de filmo dum tempintervaloj malpli longaj ol ĝi rezultigas ke la spektanto ne povas distingi la disecon inter la kadroj kaj vidas kontinuan movon. Dum tiu tempo la lumo mem vojaĝas 10000 kilometrojn.
1 mikrosekundo	La tempo kiu daŭras briladon de fotografian fulm-lumilon. Tiom kurta lumradio povas frostigi movon kaj kaŭzi ke pafita kuglo ŝajnu senmova.
1 nanosekundo	La tempo dum kiu la modernaj transistoroj baskulŝaltiĝas. Dum tiu tempo, la lumo vojaĝas unu futon (proksimume 30 centimetrojn).
1 pikosekundo	Per signaloj kiuj tiom longe daŭras, la sciencistoj frostigas molekularajn movojn kaj studas tion kio okazas dum la kemiaj reakcioj. Dum tiu tempo, la lumo apenaŭ trapasas diametron de punkto kiu estas ĉe la fino de ĉi tiu frazo.
1 femtosekundo	Dum tiu tempo, la lumo nur povas transiri 1000 siliciajn atomojn.

Funkciado de laseroj

Kvankam la unua lasero estas realigita en 1960 de Theodore Maiman [1] tamen la principo de ĝia funkciado, nomita stimulata eliĝo de radio, estis longtempe antaŭ tiu dato, en 1917 pridiskutite de Albert Einstein. Ĝi konsistas en reago de ekscitita kvantuma sistemo, molekula aŭ atoma, reage al fotono alradiata al ĝi. Rezulte de tiu ĉi procezo, la sistemo maleksčitiĝas kaj elsendas duan fotonon kiu havas trajtojn same de tiuj de la unua fotono. Aldone al la stimulata eliĝo de radio du aliaj procezoj povas okazi en la medio. Unue la ekscititaj sistemoj de materio povas spontanee maleksčitiĝi kaj elsendi fotonojn. Tiuokaze la elsendotaj fotonoj ne rilatas al eksteraj faktoroj kaj iliaj trajtoj estos hazardaj. Due la sistemoj kiuj situas en la baza energinivelo povas absorbi fotonon kaj ekscitiĝi. Tiuj du procezoj malhelpas la stimulan eliĝon de radio. La unua procezo malpliigas nombron de sistemoj kiuj povas maleksčitiĝi kaj la dua konsumas fotonojn kiuj povas stimuli maleksčitiĝon de tiaj sistemoj. En ordinaraj kondiĉoj ili superas la stimulan eliĝon de radio. Nur kiam en medio, la nombro de ekscititaj sistemoj superas tiun de sistemoj en la baza energinivelo (inversiĝo de la populacio), la stimulata eliĝo de radio povas en grado

konsiderebla okazi. Tio ne atingeblas krom en kelkaj specifaj materioj. Ekzemple Maiman, uzis stangon el rubeno kiel aktivan medion por konstrui sian laseron. Por eksciti kvantumajn sistemojn de la medio, li metis la stangon ene de helikoforman fulmolampon plene de ksenono. Elektra malŝarĝo en la fulmolampo kreis intensan lumoradion kiu siavice pumpis sistemojn de la aktiva medio al supera energinivelo. Por plifavorigi la stimulan eligon de radio, Maiman retroigis grandan parton de la kreita lumradio en la laseran medion helpe de du speguloj kiuj formis resonancan kavon. La aparato konstruita de Maiman kreis laserajn impulsojn kiuj daŭris inter mikrosekundo kaj milisekundo. Malgraŭ tio, en tiu tempo esploristoj pli interesiĝis pri kontinua eliro de laseroj. Cetere la impulsoj produktitaj de lasero de Maiman ne povis ankoraŭ rivali kun la pli kurtajn impulsojn produktitaj de elektronikaj aparatoj. En la komenco oni interesiĝis al metodoj kiuj produktis kurtajn laserajn impulsojn ĉar esploroj celis krei tre fortajn frapojn de lumradio. Ekzemple okaze de la dua konferenco pri kvantuma elektroniko organizita en Berkeley (Kalifornio) en 1961, R. W. Hellŭarth proponis koncepton de K-ŝaltado [2]. Li mem en novembro de la sama jaro raportis pri K-ŝaltado de rubena lasero uzante obturilon funkciante surbaze de la efiko de Kerr [3]. Por kompreni K-ŝaltadon oni devas rerigardi strukturon de la laseraj aparatoj. En plejmulto de la lasergeneriloj, tri partoj rekoneblas (bildo unu) :

- aktiva medio en kiu la stimolata eligo de radio okazas,
- mekanismo per kiu oni pumpas la sistemojn de la aktiva medio al la ekscitata energinivelo kreante inversiĝon de populacio.
- mekansimo por optika retroinjektado de stimolata eliĝo de radio.

Ĉi lasta parto plejofte konstruiĝas el almenaŭ du speguloj kiuj formas resonancan kavon en kiu lumradio multfoje trapasas la aktivan medion kaj ĉiufoje pli amplifikiĝas. Samtempe notindas ke dum ĉiu travojaĝo de la lumradio tra la kavo, parto el ĝi perdiĝas. La minimuma perdo okazas ĉar parto de la lumradio devas eliĝi el la kavo por konsistigi la utilan eliron de la lasero. Pro tio, almenaŭ unu el la speguloj de la resonanca kavo ne estas centprocente reflektanta kaj permesas elfluon de iom da energio eksteren. En la realo aliaj perdoformoj aldoniĝas al tia perdo. Por funkciigi laseron, energigajno rezultanta el amplifikiĝo de lumradio dum unu el ĝiaj trapasoj tra la kavo devas superi totalan perdon kiu okazas dum la sama trapaso. Por estigi K-ŝaltadon, oni alternas la perdon de lumradio en la lasera kavo. Kiam la perdo estas granda, lasera elradiado ne okazas, la aktiva medio amasigas la eksterdevenan pumpitan energion kaj nombro de ekscitataj sistemoj kreskas. Unufoje kiam tiu ĉi energio atingis certan sojlon, oni subite malpliigas la perdon de la kavo kaj permesas ke lumradio vojaĝu tra la kavo. La lumradio ekfluante tra la resonanca kavo amplifikiĝas post malmultaj travojaĝoj draste laŭ lavanga procezo. Tio rezultigas eliron de lasera lumradio sub formo de iu intensega kaj mallonga impulso. R. W. Hellŭarth mem raportis ke dum sia laboro li estis produktanta laserajn impulsojn daŭrantajn 10 nanosekundojn [3]. Aliaj esploristoj sukcesis K-ŝaltadon de laseroj metante rapidege rotaciantan spegulon anstataŭ unu el la speguloj de la lasera kavo. Tiel la totala perdo de la lasera kavo estis granda, krom en mallongegaj tempointervaloj dum kiuj la du speguloj de la kavo estis paralelaj. Kvankam la K-ŝaltado estis grava paŝo antaŭen en produkto de rapidegaj laseraj impulsoj, ĝi ne estis la plej signifa progreso ĉi-kampe. Per K-ŝaltado, oni povas produkti impulsojn kiuj minimume daŭras de 10^{-8} ĝis 10^{-9} sekundoj. Fakte la plej grava progreso rilate al produktado de mallongaj laseraj impulsoj estis eltrovo de interriglado de laseraj modoj.

Interriglado de laseraj oscilaj modoj

Lumo kun ĉiu ondolongo ne povas postresti en lasera kavo. Frekvenco de la lumradio kiu povas oscili en iu lasera kavo determiniĝas per ĝia longeco. Tio tute similas al kazo en kiu la frekvenco de sono produktita en ekzemple fluto dependas de longeco de kolono da aero kiu vibras en la muzikaparato. Tiel oni povas enkonduki la nocion pri oscilaj modoj de lasera kavo. Ondolongoj, λ_n , de permesataj modoj por ĉiu lasera kavo devas egali parajn produktojn de ĝia longeco, L :

$$\lambda_n = 2nL$$

en kiu, n, estas entjera nombro. Tion oni povas skribi por frekvenco de la permesataj oscilamodoj :

$$f_n = nc/2L$$

kaj ĉi supre, c , estas lumrapido. El (2) oni vidas ke diferenco inter du oscilaj modoj estas :

$$\Delta f = c/2L$$

Ekzemple por lasera kavo en kiu la du speguloj distancas je 1m la modoj havas frekvencajn diferencojn de 150 MHz. Tio kompare kun frekvenco de videbla lumradio ĉirkaŭ kelkcentoj da THz estas ege malgranda. Notindas ke kvankam la supera rilato donas ian limigan kondiĉon por oscilaj modoj de lumradio kiu povas postresti en la lasera kavo, tamen en funkciado de la lasero nur partoprenas tiuj modoj kiuj povas profiti la amplifikiĝadon okazantan en la aktiva medio de la lasero. Enfakte kontraŭe al tio kion oni povas unue pensi, la ekscititaj sistemoj en la lasera aktiva medio ne maleksčitiĝas reage al fotonoj posedante nur unu precizan ondolongon. Depende de materio kiu estas uzata kiel la aktiva medio, tiu medio povas amplifiki fotonojn situantajn en bendo da ondolongoj. Tiel iu nombro da oscilaj modoj de la lasera kavo povas partopreni en la funkciado de la lasero. Kiel vidite, la frekvencoj de oscilaj modoj de la lasero interrilatas. Samtempe, en ordinaraj kondiĉoj, ili oscilas kun fazoj unu senrilate al la aliaj. Interfero de modoj tiel oscilantaj rezultigas eliron hazarde fluktuantan tra la tempo (bildo du). Oni povas montri ke se la fazoj de oscilaj modoj de lasero estas interrilataj, eliro de la lasero estos serio da impulsoj kies longeco inverse proporcias al frekvenca amplekso tra kie la modoj estas disvastigitaj. Ni vidis ke tiu amplekseco dependas de la materio uzata kiel aktiva medio de la lasero. Des pli larĝa estas bendo da frekvencoj amplifikebla per lasera aktiva medio, ju pli kurtaj estas impulsoj atingeblaj per interriglado de la modoj. Se la bendo da frekvencoj amplifikeblaj per la aktiva medio havas larĝecon $\Delta\nu$, tiam interriglante oscilajn modojn situantajn en ĝi oni povas atingi impulsojn kies daŭro, $\Delta\tau$, proksimume estos donata per la jena formulo:

$$\Delta\nu = 1/ \Delta\tau$$

Pro tio, ekzemple interriglado de modoj en laseroj kun gasaj aktivaj medioj kies larĝeco de la amplifikebla bendo da frekvencoj ofte ne estas tre granda ne rezultigas tre kurtajn impulsojn. Malgraŭ tiu fakto, unuafoje interriglado de laseraj modoj realiĝis por helium-neona (He-Ne) lasero en 1964 [4]. Por interrilatigi fazojn de oscilaj modoj, oni enigis en la laseran kavon, kristalon kies refraktindico estis modulita de sonondo. Tiel oni modulis perdon kiu rilatis al ĉiu permesita lasera modo kaj konsekvence rezultigis ilian sinkroniĝon. Kompreneble pro mallarĝeco de la amplifikebla bendo da frekvencoj en miksaĵo el heliumo kaj neono, $\Delta\nu \approx 1.5$ GHz (tio signifas ke en resonanca kavo je longeco de 1 metro, nur 1000 oscilaj modoj situas en tiu bendo), per interriglado de ĝiaj modoj oni ne sukcesis produkti impulsojn pli mallongajn ol unu nanosekondon. Ĉar energio bezonata por funkciado de mekanismo kiu kaŭzis interrigladon de la laseraj modoj en la supre menciita laboro devenis el ekster la lasera sistemo mem, oni nomas tion aktiva interriglado de laseraj modoj. Por aktiva interriglado de laseraj modoj oni povas moduli optikan perdon en la lasera kavo. Tio rezultigas moduliĝon de la amplitudon de la lasera lumradio (amplituda modulado - AM). Ankaŭ oni povas moduli fazon de diversaj modoj kiuj konsistigas la laseran lumradion (faza modulado - FM). Pli poste aktivaj metodoj uziĝis por interrigladi la modojn de diversaj tipoj de la lasero. Antaŭ tio oni trovis ke eblas uzi energion de la lasera lumradio mem por funkciigi interriglantian mekanismon. Oni nomas tion pasiva interriglado de la laseraj modoj. Unu el la plej vaste uzataj metodoj por pasive interrigladi laserajn modojn estas enigi konvenan satureblan lumosorbanton en la laseran kavon. Ĝi estas materio kies optika maldiafaneco malpliĝas kiam intenseco de la lumradio alradiita al ĝi pliiĝas. Por la unua fojo tiel pasiva interriglado de la laseraj modoj elmontriĝis per Mocker kaj Collins en 1965 per rubena lasero [5]. En 1966 DeMaria kaj liaj kunlaborantoj produktis la unuajn laserajn impulsojn kiuj daŭris malpli ol unu nanosekondon [6]. Por fari tion, ili pasive interrigladis modojn de Nd-vitra lasero uzante tinkturan substancon kiel satureblan lumosorbanton. Atingi tiom kurtajn impulsojn eblis ĉar Nd-vitro (vitro dopite per neodimo) kiel aktiva medio povas amplifiki frekvencojn en relative larĝa bendo, $\Delta\nu \approx 3$ THz (en resonanca kavo je longeco de 1 metro, 2000000 oscilaj modoj situas en tiu ĉi amplekso). Kvankam ekzakta mekanismo kiu kaŭzas interrigladon de laseraj modoj pere de saturebla lumosorbanto estas komplika kaj malfacile priklarigebla, tamen oni povas tiel komprenigi ĝin: hazardaj kulminecoj de la lumordia intenseco en la lasera kavo povas okazi rezulte de fluktuoj en amplifikitaj spontaneaj elradioj de la aktiva medio. Ĉar maldiafaneco de la lumosorbanto dependas de la

lumintenseco, tiuj ĉi kulminecoj traspertas malpli grandajn sorbiĝojn kaj konsekvence ĝuas pli favoran amplifikiĝon per la aktiva medio. Rezulte post malmultenombraj travojaĝoj de la impulso en la lasera kavon, ĝi gajnas grandan parton de la energio pumpita en la aktivan medion. Pasiva interriglado de laseraj modoj disponigis facilan metodon por generi kurtajn impulsojn. Uzante aktivajn mediojn kiel Nd-vitron aŭ Nd-iagon (grenato el itrio-aluminio dopite per neodimo) kiuj povas amplifiki larĝajn ampleksojn de la frekvenco ebligis produkti laserajn impulsojn daŭrantajn kelkdekajn pikosekundojn. Tiuj kurtaj impulsoj rapide trovis gravan rolon en diversaj esploraj laboratorioj ĉirkaŭ la mondo.

Malpli ol pikosekundo

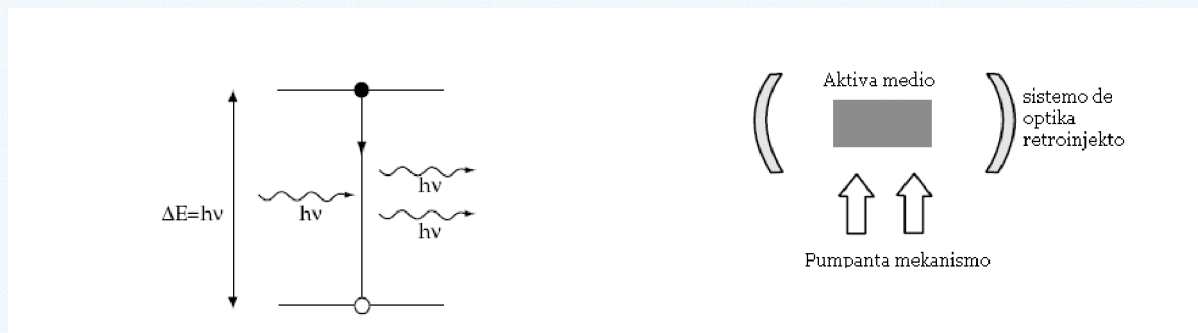
Laseroj kun solidaj aktivaj medioj ne estis la nuraj aparatoj promisdonantaj pri la produkto de tre kurtaj laseraj impulsoj. Jam de post 1966 oni estis montrinta ke eblas uzi iujn tinkturajn substancojn kiel laseran aktivan medion [7]. Tiuj materioj povas amplifiki lumoradion tra larĝa bendo da frekvencoj. Do sciencistoj atendis ke interriglante modojn de tiaj laseroj ili sukcesas produkti tre kurtajn impulsojn. Fakte realigante tion en 1974, oni produktis la unuajn laserajn impulsojn kiuj daŭris malpli ol unu pikosekondon [8]. En tiu laboro la lasera aktiva medio (Rhodamine 6G) kaj satirebla lumosorbanto (DODCI - 3,3'-jodido de dietiloksido de karbocianino) ambaŭ estis el tinkturaj substancoj kaj likvidaj. Pliposte oni eltrovis ke uzante laseran kavon kun ringforma geometrio kaj direktante du laserajn impulsojn en tia strukturo por ke ili renkontu unu la alian en la satireblan lumosorbanton rendimento de la modointerriglado kreskas [9]. Tion oni nomis interriglado de laseraj modoj kun interkoliziantaj impulsoj (anglalingve Colliding Pulse Mode-Locking, CPM). Uzante ĝin oni por la unua fojo produktis laserajn impulsojn kiuj daŭris 100 femtosekundojn. Tio ne estis la tuta progreso en produkto de ultrakurtaj optikaj impulsoj. En la sama 80-a jardeko oni ankaŭ solvis alian problemon kiu estis disperso de la gruporapido (DGR). Ĝi malhelpas propagiĝon de la ultrarapidaj optikaj impulsoj en materio. Iu optika impulso ne povas konsisti el unufrekvenca lumo sed el bendo da frekvencoj kiuj kune vojaĝas tra spaco. Oni povas montri ke larĝeco de tiu ĉi frekvenca bendo estas inverse proporcia al tempa longeco de la impulso mem. Tiel des pli kurta estas iu impulso ju pli larĝa estas bendo da frekvencoj kiuj ĝin konsistigas. En la vakuo diversaj partoj de la frekvenca bendo vojaĝas je sama rapido. Do ili atingas ĉiun punkton de sia vojo samtempe. En dispersanta medio kiel la aero, akvo aŭ vitro diversaj frekvencoj konsistigantaj la impulson vojaĝas kun malsamaj rapidoj. En normalaj kondiĉoj kaj por plejparto de okazoj tiu parto de impulso kies frekvenco estas pli granda vojaĝas malpli rapide ol partoj kiuj havas malpli grandajn frekvencojn. Tio signifas ke en videbla spektro la blua parto de la lumoradio vojaĝas malpli rapide ol ĝia ruĝa parto tra dispersantaj materioj. Tiam kiam optika impulso propagiĝas tra materio tio kaŭzas ke diversaj partoj de la impulso apartiĝas kaj tempe plilongigas ĝin. Tiu plilongiĝo plejofte kaj temante pri la kelk-pikosekundaj impulsoj estas neglektebla, sed por femtosekundaj impulsoj ĝi povas esti konsiderebla. Feliĉe uzante optikajn prismojn kaj metante ilin, oni povas kompensi plilarĝiĝon de impulso kaŭzite de ĝiaj trapasoj tra aliaj optikaj elementoj de la sistemo. Uzante tian kompensantan sistemon aldone al interriglado de modoj de tinktura lasero kun interkoliziantaj impulsoj, oni produktis impulsoj ekstreme kurtaj kiuj nur daŭris 30 fs [10]. Tiuj ĉi progresoj ĉefe okazis uzante tinkturajn laserojn. En 80-aj jaroj tiaj laseroj iĝis la plej uzataj en laboratorioj kiuj studis ultrarapidajn fenomenojn. Nova branĉo de la kemio aperis. Ĝi intencis studi kemiajn fenomenojn kiuj okazas en tre mallongaj tempoj. Oni nomis ĝin la femtokemio kaj laboro pri ĝi havigis Nobelan premion al Ahmed Zeŭail en 1999 [11]. Malgraŭ tio ĉio, la tinkturaj laseroj havas grandajn malavantaĝojn inter kiuj la likvideco de ilia aktiva medio faras iliajn konstruojn tre komplikaj. Pro tio, atento de sciencistoj tiriĝis al direkto de solid-stataj aktivaj medioj kiuj povis produkti ultrarapidajn laserajn impulsojn. En la sama 80-a jardeko elmontriĝis gravaj utilecoj de unu el tiaj materioj. Ĝi estis Ti:safiro (cristalo de safiro - Al₂O₃ - dopite per titanio) [12]. Nur kelkaj jaroj post ĝia eltrovo Ti:safiro trovis gravan rolon en studo ultrarapidaj fenomenoj. Ĝi povas facile amplifiki lumoradiojn kies ondolongoj situas inter 660 nm kaj 1180 nm. La bendo da frekvencoj kiujn Ti:safiro povas amplifiki havas larĝecon de 100 THz (pli ol 60000000 oscilaj modoj de resonanca kavon je longeco de 1 metro situas en tiu ĉi bendo). En Ti:safiraj laseroj ankaŭ kompensante la DGR-on apud interriglado de modoj oni povas atingi pli kurtajn impulsojn. La plej kurtaj laseraj impulsoj viditaj ĝis nun estas produktitaj per Ti:safira lasero kaj ilia daŭro estas 8 fs [13]. Oni povas utiligi duonkonduktantajn laserojn por pumpi Ti:safirajn

laserojn kaj tio forigas bezonon al komplikaj sistemoj de pumpado. En 1991, Spence, Kean kaj Sibbett malkovris ke interriglado de modoj en Ti:safira lasero povas okazi spontanee kaj sen bezono al iu ajna aldonata mekanismo [14]. Tio estis grava progreso kaj pli faciligis produkton de ultrarapidaj impulsoj per Ti:safiraj laseroj. Kvankam ĝis nun la Ti:safiro restas la plej efika aktiva medio por konstrui laserojn kiuj celas produkti ultrarapidajn impulsojn, tamen esploro por trovi aliajn materiojn kiuj povas uziĝi anstataŭ ĝi. Lastatempe multaj el tiaj materioj estas malkovritaj. Samtempe la revo de sciencistoj estas produkti impulsojn kiuj daŭras nur atosekundojn (unu atosekundo egalas al 10^{-18} s). Tio estas malfacila tasko ĉar ĉi-rilate la lasera teknologio estas ege alproksimigita al iuj limoj de la fiziko.

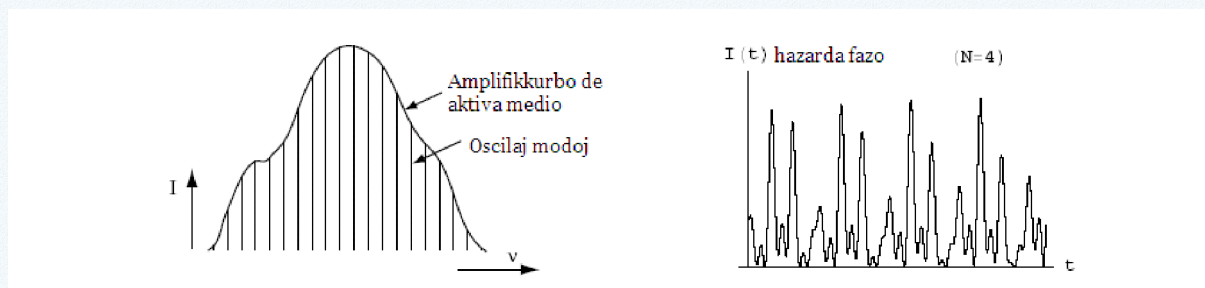
Behrouz SOROUSHIAN

Pliaj legaĵoj :

- [1] T. H. Maiman, Nature, 187, 493 (1960).
- [2] R. W. Hellüarth, Advances in Quantum Electronics, Ed. J. R. Singer (Columbia University, Neŭ York), p. 334 (1961).
- [3] R. W. Hellüarth, Bull. Am. Phys. Soc., 6, 414 (1961).
- [4] L. E. Hargrove, R. L. Fork, M. A. Pollack, Appl. Phys. Lett., 5, 4 (1964).
- [5] H. W. Mocker, R. J. Collins, Appl. Phys. Lett., 7, 270 (1965).
- [6] A. J. DeMaria, D. A. Stetser, H. Heinan, Appl. Phys. Lett., 8, 174 (1966).
- [7] F. P. Schafer, F. P. W. Schmidh, J. Volze, Appl. Phys. Lett., 9, 306 (1966).
- [8] C. V. Shank, E. P. Ippen, Appl. Phys. Lett., 24, 373 (1974).
- [9] R. L. Fork, B. I. Greene, C. V. Shank, Appl. Phys. Lett., 38, 671 (1981).
- [10] J. A. Valdmanis, R. L. Fork, IEEE J. Quant. Elect., 22, 112 (1986).
- [11] A. H. Zeŭail, J. Phys. Chem., 97, 12427, (1993).
- [12] P. F. Moulton, J. Opt. Soc. Am. B., 3, 125 (1986).
- [13] J. P. Zhou, G. Taft, C. P. Huang, M. M. Murnane, H. C. Kaptyn, Opt. Lett., 19, 1149 (1994).
- [14] D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett, Opt. Lett., 16, 42 (1991).



Bildo 1. – mekanismo de stimulata eliĝo de radio kaj tipa strukturo de lasero.



Bildo 2. – oscilaj modoj kaj hazarda eliĝo de lasero rezulte de sinrilateco inter oscilantaj modoj de lasero.