



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI,
PROTECȚIEI SOCIALE ȘI
PERSOANELOR VĂRSTNICE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
NAȚIONALE

OIPOSDRU



Universitatea
POLITEHNICA
din București

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Investește în oameni!

Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Proiect POSDRU/107/1.5/S/76903 – *Formarea viitorilor cercetatori-experti prin programe de burse doctorale (EXPERT)*



UNIVERSITATEA **POLITEHNICA** DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Electronică Telecomunicații și Tehnologia Informației
Departamentul Tehnologie Electronică și Fiabilitate

*Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare
a rezistenței materialelor și componentelor optice în câmp laser*

*Contributions to development of automated test-stations for certification
of behavior of optical materials and components subjected to laser beams*

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Autor: Ing. ALEXANDRU ZORILĂ

Conducător de doctorat: Prof.dr.ing. PAUL ȘCHIOPU

București, 2014

Cuprins

Mulțumiri	3
Obiective teză	4
1. Introducere	5
2. Dezvoltarea stațiilor pentru măsurarea PDCL	7
2.1. Stația automată pentru măsurarea PDCL cu pulsuri laser de nanosecunde	7
2.2. Stația automată pentru măsurarea PDCL cu pulsuri laser de femtosecunde	10
2.3. Implementarea sistemului optic de zoom variabil al spotului în planul țintei	10
2.4. Contribuții personale	11
3. Algoritm de operare al stațiilor	12
3.4. Contribuții personale	14
4. Detecția în timp real a defectelor induse pe suprafețe optice	14
4.1.	Rezultate experimentale 15
4.2.	Contribuții personale 16
5. Măsurarea ariei efective a fasciculelor laser în planul probei	17
5.2. Metoda de măsurare	17
5.3. Simulări Matlab	17
5.3.2. Eroarea introdusă de zgomotul alb gaussian	18
5.5. Rezultate experimentale	19
5.6. Contribuții personale	19
6. Măsurarea duratei efective a pulsurilor laser de ordinul nanosecundelor și femtosecundelor	20
6.2. Definiția duratei efective a pulsurilor laser și principiul de măsurare	21
6.2.1. Definiție	21
6.2.2. Principiul de măsurare	22
6.3. Scala de nanosecunde	22
6.3.3. Rezultate experimentale: măsurări directe și diverse medieri.....	22
6.4. Scala de femtosecunde	24
6.4.2. Măsurarea duratei efective a pulsurilor cu GRENOUILLE.....	24
6.5. Contribuții personale	25
7. Studii și măsurări ale pragului de distrugere în câmp laser	25
7.1. Mecanisme de distrugere	26
7.3. Măsurări PDCL	28
7.3.1. Măsurări PDCL acoperiri dielectrice	28
7.3.3. Măsurări PDCL prin testul S-on-1 efectuate pe stația automată în pulsuri de nanosecunde	29
7.4. Testul de intercomparare cu laboratoarele Laser Zentrum Hannover e.V. și Vilnius University - LRC	31
7.4.1. Introducere	Error! Bookmark not defined.
7.4.4. Concluzii privind măsurările ISOT, LZH și VU	31
7.5. Contribuții personale	33
Concluzii	34
C.2. Contribuții personale	34

Mulțumiri

- În primul rând doresc să mulțumesc domnului Profesor Paul Șchiopu, coordonator al acestei teze de doctorat, pentru îndrumarea și susținerea acordată pe parcursul anilor, de când ne-am cunoscut la cursuri până în prezent și sper că pe viitor colaborarea noastră să rămână la fel de strânsă și fructuoasă.

- Mulțumesc familiei mele, soția și fetița mea care îmi oferă dragoste și liniște sufletească. Mamei și tatălui meu care m-au susținut pe tot parcursul drumului pe care merg azi.

- Mulțumesc domnului Aurel Stratan care m-a susținut în experimentele efectuate, domnului George Nemeș pentru sfaturile și îndrumările oferite pe perioada studiilor de doctorat, fără dumneavoastră partea experimentală a tezei ar fi rămas doar „teorie”.

- Mulțumesc tuturor colegilor din Laboratorul ISOTEST, din cadrul Institutului Național de Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației, fără de care nu aș fi putut avea realizările prezentate în această teză și pentru că toate ideile bune au fost rezultatul discuțiilor fructuoase cu această echipă.

- Rezultatele prezentate în acesta lucrare au fost obținute cu sprijinul Ministerului Muncii, Familiei și Protecției Sociale prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract nr. POSDRU/107/1.5/S/76903.

- Componentele optice (oglinzi, acoperiri AR) utilizate în experimente pentru studiile din această lucrare au fost furnizate de firma Ophir Optics SRL, București, România.

Această listă de mulțumiri este prea scurtă pentru a include pe toată lumea care a avut încredere în mine și care m-a susținut până acum, deci dacă nu menționez în ea pe toată lumea asta nu înseamnă că am uitat pe cineva.

Obiective teză

- i. Construirea de la zero a două stații automate de determinare PDCL în regim multipuls, o stație având laserul de test cu pulsuri de nanosecunde și o stație având laserul de test cu pulsuri de femtosecunde.
- ii. Implementarea pe aceste două stații a algoritmului de determinare PDCL în regim multipuls (S-on-1).
- iii. Dezvoltarea și implementarea unei metode de detecție în timp real a defectelor induse pe suprafețe optice în timpul testului de determinare PDCL.
- iv. Dezvoltarea și implementarea unei metode de caracterizare fascicul laser de test, caracterizare orientată pe parametrii necesari determinărilor PDCL (arie efectivă de fascicul, durata efectivă a pulsurilor laser).
- v. Efectuarea de studii și măsurări de determinare PDCL pe cele două stații, măsurări în conformitate cu standardele ISO care reglementează aceste tipuri de teste, pentru producători de componente optice din industrie. Aceste măsurări sunt o premieră în România.
- vi. Atestarea rezultatelor măsurărilor prin studii de intercomparare cu laboratoare recunoscute la nivel internațional, cu experiență în domeniu.

1. Introducere

Componentele optice utilizate pentru generarea, direcționarea sau focalizarea fasciculelor laser de mare putere trebuie să prezinte o caracteristică de rezistență în câmp laser, rezistența care este imperios necesară pentru o funcționare fiabilă a sistemelor laser destinate unei game largi de aplicații științifice, tehnologice, spațiale sau biomedicale.

Rezistența în câmp laser a unei componente optice sau a unui material optic este caracterizată prin **Pragul de Distrugere în Câmp Laser (PDCL)**. PDCL este o caracteristică fizică a unei componente optice care definește un nivel critic al cantității de radiație laser care induce o modificare ireversibilă (sau distrugere) în structura acesteia.

Standardul internațional ISO 21254-1, 2, 3, 4: 2011, care reglementează metodele de măsurare și de testare a PDCL, definește PDCL ca fiind cantitatea maximă de radiație laser incidentă pe o componentă optică pentru care probabilitatea extrapolată de distrugere este zero, unde cantitatea de radiație laser poate fi exprimată în densitate de energie (fluență), densitate de putere sau densitate liniară de putere.

Conform legendei, se spune că Arhimede din Siracuză ar fi distrus complet o flotă romană în timpul asediului Siracuzei (214-212 î.Hr.) utilizând radiația solară focalizată cu ajutorul unor oglinzi. Apoi, după mai mult de 2000 de ani, odată cu apariția primului laser (laserul cu rubin cu emisie în vizibil la lungimea de undă de 694 nm), realizat de Theodore Maiman în anul 1960) [1], a devenit disponibilă o sursă de lumină mult mai intensă decât radiația solară. Trei ani mai târziu, în anul 1963, Paul D Marker raporta primul defect indus pe o suprafață optică cu acoperire dielectrică transparentă prin focalizarea unui fascicul produs de un laser cu rubin cu emisie în pulsuri [2]. De atunci laserii au evoluat rapid prin diversificarea regimurilor de operare (de la undă continuă până la emisie în pulsuri cu durate de zeci de femtosecunde), prin creșterea continuă a puterii în fascicul, ameliorarea semnificativă a caracteristicilor de propagare / focalizare ale fasciculelor laser, și prin lărgirea domeniului spectral al emisiei laser de la ultravioletul îndepărtat la infraroșu apropiat. Această evoluție spectaculoasă a domeniului laserilor a fost susținută de o dezvoltare corespunzătoare a tehnologiei de fabricare a componentelor optice de mare putere, capabilă să ofere produse fiabile, având un nivel ridicat și bine definit al PDCL. Evaluarea cu acuratețe a PDCL a fost și rămâne în continuare o cerință majoră în dezvoltarea tehnologiilor de fabricație a componentelor optice pentru laserii de mare putere.

Stadiul actual în domeniul distrugerii în câmp laser ("laser damage") este revizuit anual la cea mai importantă conferință internațională din domeniu, "SPIE Laser Damage – Annual Symposium on Optical Materials for High-Power Lasers", cunoscută și sub

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser denumirea "Boulder Damage Symposium" deoarece are loc în localitatea Boulder, Colorado, SUA. Această conferința, care va ajunge la cea de a 46-a ediție în anul 2014, este principalul forum mondial pentru schimbul de informații privind interacția fasciculelor laser intense cu materialele și componentele optice și pentru toate aspectele legate de distrugerea în câmp laser. Dinamica dezvoltării acestui domeniu de mare actualitate este ilustrată în Fig. 1.1 care arată numărul de publicații care conțin sintagma "laser damage" apărute anual în perioada 1960-2013, conform bazei de date SCOPUS. Această statistică indică o dublare a numărului anual de publicații la fiecare 10 ani, ajungând până la un număr de circa 1300 publicații în anul 2013.

Pentru obținerea unei puteri din ce în ce mai mari furnizată de sistemele laser, este necesară îmbunătățirea continuă a performanțelor de rezistență a componentelor optice și a acoperirilor optice. De aceea, este necesar să avem componente cu absorbție și difuzie mică și cu o valoare ridicată a PDCL. În cele mai multe cazuri, acoperirile componentelor optice sunt cele care limitează performanțele enumerate mai sus. Măsurări reproductibile și exacte ale PDCL sunt indispensabile pentru efectuarea de studii de optimizare a componentelor și acoperirilor optice.

Bazele standardului ISO 11254 [3], primul standard care a reglementat procedura de determinare a PDCL-ului, au fost puse după un experiment de tip "round-robin" la nivel internațional (la începutul anilor '80) pe componente optice cu acoperiri la 1064 nm [4]. Experimentul era necesar din cauza diferitelor interpretări a metodei de măsurare a PDCL-ului și de aici și a diferitelor valori obținute ale PDCL-ului. După discuții de mai mult de zece ani pe marginea acestui experiment a fost elaborat standardul ISO 11254 [5, 6].

Principala dificultate în definirea și evaluarea cu acuratețe a PDCL în orice instalație de măsurare este dată de multitudinea factorilor de influență care contribuie la stabilirea valorii PDCL: distribuția densității de energie a spotului laser pe suprafața optică de test; forma și durata profilului temporal al pulsurilor laser de test; lungimea de undă laser; un anumit grad

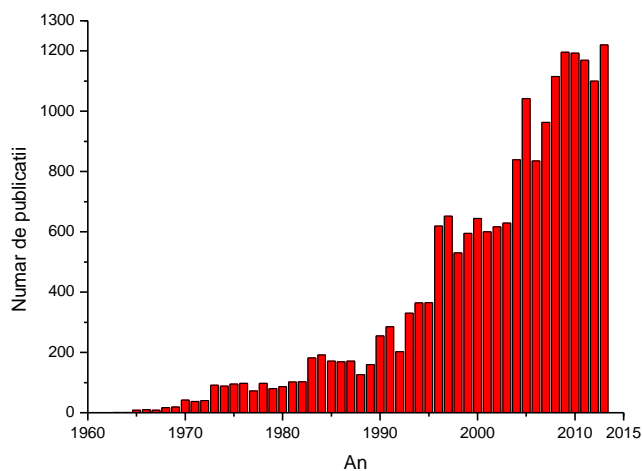


Fig. 1.1. Numărul de publicații științifice care conțin "laser damage", conform bazei de date SCOPUS.

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser de neomogenitate spațială a caracteristicii de rezistență în câmp laser a componentelor optice, cauzată de distribuția aleatorie a microdefectelor și incluziunilor pe suprafețele optice; distribuție aleatorie rezultată în urma proceselor de polisare și acoperire, criteriul de definire a defectelor, metoda de măsurare a parametrilor de fascicul, numărul maxim de pulsuri aplicate per sit, măsurarea energiei pulsurilor; fac dificilă compararea rezultatelor obținute pe instalații diferite de măsurare a PDCL [7].

Mecanismele fundamentale de distrugere laser, protocoalele de măsurare a PDCL, caracterizarea materialelor optice, contaminarea componentelor optice pe durata ciclului de fabricație, defectele de pe suprafață și din volumul materialelor optice reprezintă direcții de cercetare de mare actualitate la nivel mondial în domeniul materialelor optice de mare putere pentru aplicații laser. După cum arată și graficul din Fig. 1.1., se observă o creștere accentuată a numărului de publicații în acest domeniu, domeniu în continuă creștere, similară cu creșterea puterii și intensității sistemelor laser noi apărute. Cele mai importante publicații în domeniu apar în Proceedings-urile Conferinței „Annual Boulder Damage”, publicate de SPIE (original publicate de „Special Publications of the US National Bureau of Standards”), cât și în reviste de specialitate (Optical Engineering, Applied Surface Science, etc.).

2. Dezvoltarea stațiilor pentru măsurarea PDCL

În acest capitol voi prezenta soluțiile implementate pentru construirea de la zero a stațiilor pentru măsurările de tip PDCL la standarde ISO. Pentru determinarea PDCL standardul ISO 21254 recomandă folosirea unei scheme de principiu cu un laser de test urmat de un atenuator variabil pentru setarea energiei, un sistem de focalizare a fasciculului, un sistem de diagnoză de fascicul, un sistem de poziționare a componentei testate în fascicul și un sistem de detecție a defectelor induse de laser pe componenta testată. Fiecare din aceste componente nu sunt detaliate, astfel încât implementarea trebuie concepută de fiecare utilizator adaptată pe un anumit tip de componente testate. Rezultatele originale din acest capitol au fost publicate/prezentate în: [P1], [P2], [L4], [C1], [C2], [C4], [C5], [C6], [C7], [C8], [C11], [C13]; precum și în rapoartele de cercetare ale proiectului ISOTEST (<http://ssll.inflpr.ro/isotest/index.htm>).

2.1. Stația automată pentru măsurarea PDCL cu pulsuri laser de nanosecunde

Pe această stație sunt implementate două proceduri ISO:

- Testul S-on-1 pentru măsurarea PDCL în regim multipuls, conform ISO 21254-2[8];

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser

- Testul de Fiabilitate tip 2 pentru testarea fiabilității componentelor iradiate la un nivel prestabilit al densității de putere laser, conform ISO 21254-3 [9].

Testul ISO S-on-1 reprezintă o procedură completă de măsurare a PDCL, care oferă o vedere de ansamblu asupra performanței de rezistență în câmp laser a probei investigate [10] și care permite o estimare cantitativă a duratei de viață a probei. Rezultatul măsurării este caracteristică S-on-1 de distrugere a probei, care arată dependența densității de energie laser la pragul de distrugere funcție de numărul de pulsuri laser aplicate pe probă, pentru două valori ale probabilității de distrugere (0 % și 50 %), așa cum se arată în exemplul din Fig. 2.1. Aici este reprezentată caracteristica de distrugere a unei acoperiri dielectrice anti-reflectante (AR) de bandă largă (600 nm – 1100 nm) măsurată în laboratorul ISOTEST pe o probă furnizată de producătorul Ophir Optics SRL din București (parte a firmei Newport Corp. din SUA). Densitatea de energie laser maxim admisibilă pentru o funcționare fiabilă îndelungată a componentei optice se obține prin extrapolarea caracteristicii 0% PDCL pentru un număr mare de pulsuri. Pentru caracteristica 0 % PDCL din Fig. 2.1, a rezultat o densitate de energie laser per puls de 19 J/cm^2 la pragul de distrugere, pentru un număr de 10^8 pulsuri cu durată de 6 ns și frecvență de repetiție 10 Hz, echivalența cu o densitate de putere laser la prag de 3 GW/cm^2 . Morfologia unui sit distrus este arătată în Fig. 2.2.

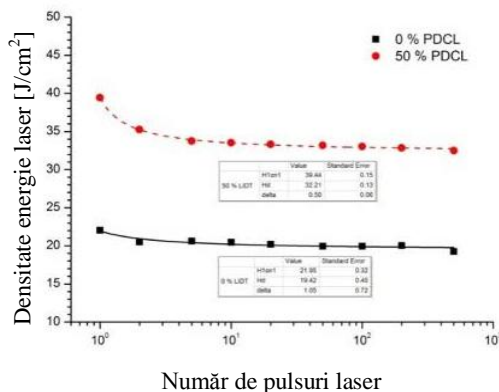


Fig. 2.1. Caracteristica de distrugere a unei acoperiri dielectrice AR.

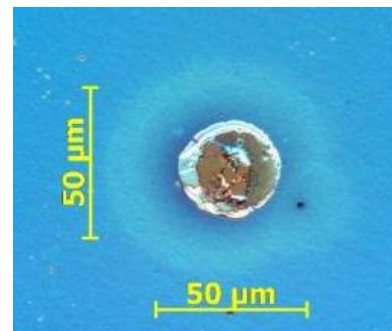


Fig. 2.2. Morfologia unui sit distrus vizualizată cu un microscop Nomarski (densitate de energie 32 J/cm^2).

În Fig. 2.3 este arătată structura instalației automate pentru procedurile de caracterizare a componentelor optice și a materialelor. Fasciculul de test furnizat de un laser cu emisie în pulsuri de nanosecunde (având caracteristici de fascicul reproductibile) este setat la energia de puls dorită cu ajutorul unui atenuator variabil comandat de calculator, fiind aplicat apoi pe suprafața probei testate care este poziționată în planul focal al sistemului de focalizare.

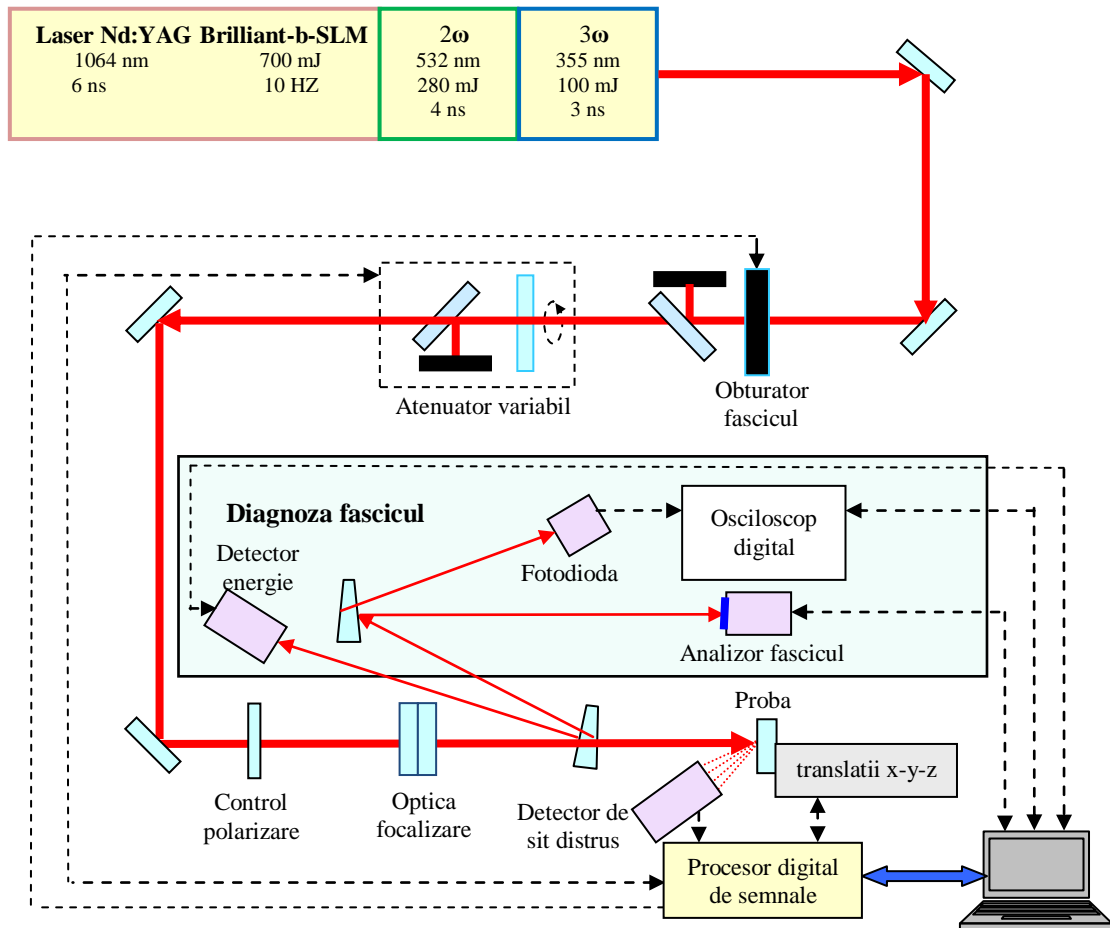


Fig. 2.3. Stația automată pentru măsurarea PDCL cu pulsuri de nanosecunde - schema bloc.

Proba este montată pe un sistem micrometric de translație (X, Y, Z) utilizat pentru poziționarea în fasciculul de test a siturilor de pe proba de testat ce trebuie iradiate. Starea de polarizare a fasciculului este setată cu ajutorul unui selector de polarizare (lame semiundă sau sfert de undă).

O fracțiune din fasciculul incident este direcționată spre modulul de diagnoză, care determină simultan energia per puls, distribuția profilului spațial de fascicul și profilul temporal al pulsului laser.

Cu această stație au fost efectuate numeroase teste S-on-1 și au fost emise buletine de încercări pentru componente puse la dispoziție de firma producătoare de componente optice Ophir Optics LLC din București. Rezultatele Laboratorului ISOTEST au fost apreciate și la cea mai importantă conferință internațională anuală din domeniu, Laser Damage, ediția 44, Boulder, Colorado, USA, 22-25 Sept. 2012, unde au fost prezentate două lucrări. La această conferință România a fost remarcată în cuvântul de deschidere că un nou participant în premieră la elita țărilor implicate în astfel de teste, alături de "veterani" ca SUA, Germania, China, Franța, Japonia și Lituania.

2.2. Stația automată pentru măsurarea PDCL cu pulsuri laser de femtosecunde

Pe această stație este implementat testul S-on-1 pentru măsurarea PDCL, conform ISO 21254-2. Structura stației în femtosecunde este în principiu similară cu cea a stației de nanosecunde, descrisă mai sus, diferența fiind legată de modulul de diagnoză, care este echipat cu un dispozitiv GRENOUILLE pentru măsurarea profilului temporal al pulsurilor generate de sursa laser de test în pulsuri de femtosecunde (sistemul laser CPA-2101 Clark-MXR, durata de puls 200 fs - 300 fs, energie pe puls 0.6 mJ, frecvența de repetiție 2 kHz, lungimea de undă 775 nm).

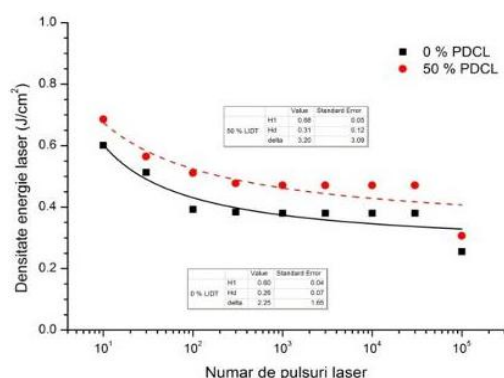


Fig. 2.4. Caracteristica de distrugere a unei oglinzi metalice.

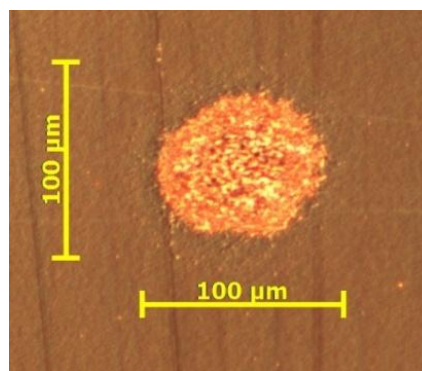


Fig. 2.5. Morfologia unui sit distrus vizualizat cu microscop Nomarski.

În Fig. 2.8 este arătată o caracteristică de distrugere măsurată pe o oglindă metalică multistrat (crom 20 nm, argint 200 nm, aur 20 nm). Prin extrapolarea caracteristicii 0% PDCL pentru 10^{12} pulsuri aplicate pe probă, a rezultat o densitate de energie laser per puls de 0.21 J/cm^2 la pragul de distrugere, pentru o durată de puls de 280 fs și o frecvență de repetiție a pulsurilor de 2 kHz, echivalentă cu o densitate de putere laser la prag de 750 GW/cm^2 . Morfologia unui sit distrus este arătată în Fig. 2.9.

2.3. Implementarea sistemului optic de zoom variabil al spotului în planul țintei

Conform recomandărilor standardului ISO 21254-3, testul de fiabilitate tip 2 trebuie să fie efectuat cu un spot laser de arie mare (diametrul efectiv de spot 1.5 mm), având un profil spațial fără modulații semnificative, apropiat de profilul ideal rectangular (top-hat). Acest tip de profil a fost obținut cu un sistem optic cu zoom tip Varispot [11], realizat cu două lentile cilindrice cu distanța focală de 1 m. Cu acest sistem sunt testate câteva situri pe fiecare probă,

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser dispuse în configurație rectangulară în zona centrală a probelor. Separarea între două situri adiacente este de câteva diametre efective de spot, în funcție de dimensiunile probei.

La o distanță fixă de la planul de ieșire al dispozitivului VariSpot se obține un spot de diferite dimensiuni în funcție de unghiul de lucru al dispozitivului. Acest plan de lucru se determină experimental măsurând distanța de separare între planul de lucru și planul median al sistemului VariSpot.

Astfel prin implementarea acestui sistem optic de zoom variabil obținem într-un plan fix de lucru, un spot de dimensiuni diferite, dar și o variație continuă a formei profilului 2D lateral al spotului de la aproape Gaussian la aproape Top-hat. Spotul de formă Gaussiană este folosit pentru procedurile 1-on-1 și S-on-1 conform recomandărilor standardelor ISO 21254 1, 2. Spotul de formă Top-hat este folosit pentru testarea nivelului de fiabilitate a componentelor optice conform părții a treia a aceluiași standard ISO.

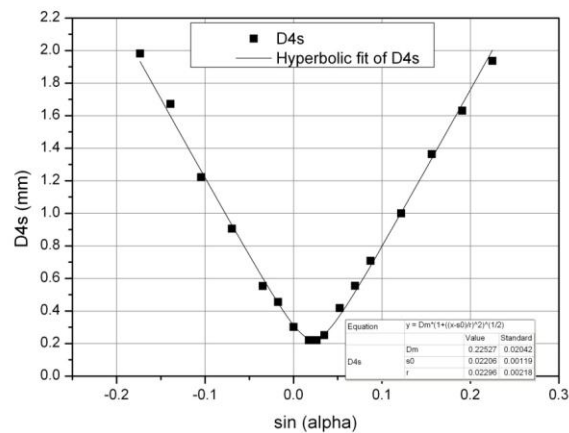


Fig. 2.6. Variația diametrului de spot în planul țintei în funcție de unghiul α .

2.4. Contribuții personale

Am proiectat și dezvoltat diverse părți componente ale celor două stații automate pentru determinarea PDCL în regim monopuls, conform ISO 21254-1, în regim multipuls conform ISO 21254-2, și testul de fiabilitate conform 21254-3. În prezent cu aceste stații se efectuează teste de determinare PDCL pentru producătorii de componente optice din industrie. Principalele contribuții au fost aduse la sistemul de detecție a defectelor (detaliat în Capitolul 4), la sistemul de diagnoză de fascicul (Capitolul 5 și 6).

Am modelat și aplicat o nouă metodă de calcul a parametrilor de propagare a fasciculelor laser, metoda ce a dus la reducerea erorilor de determinare a parametrilor cu mai mult de un ordin de mărime [C1].

Am participat la implementarea sistemului optic de zoom variabil în planul probei, sistem ce oferă posibilitatea reglajului diametrului efectiv al fasciculului fără a deplasa proba de-a lungul axei de propagare a fasciculului. Pe baza acestei implementări, a sistemului optic

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser cu zoom variabil, a fost depusă o cerere de brevet de invenție la *Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci* cu numele și numărul: *Metoda de control a dimensiunii și a profilului spațial ale spotului laser în planul țintei*; A / 00326 din 26.04.2013 [P1].

Rezultatele implementării acestor stații au fost publicate la cea mai prestigioasă conferință din acest domeniu în [12] și [13]

3. Algoritmul de operare al stațiilor

La baza funcționării instalației se află algoritmul S-on-1. Procedurile de testare a pragului de distrugere pentru componentele optice sunt descrise de standardul ISO-21254. Prima parte descrie algoritmul 1-on-1, partea a doua descrie algoritmul S-on-1. Procedura 1-on-1 înseamnă explorarea suprafeței testate cu un puls laser pe un singur sit, puls laser de diferite energii. Procedura S-on-1 înseamnă folosirea mai multor pulsuri de explorare [14] (S) pe un sit. Această metodă este mai puternică (oferă o acuratețe mai mare) pentru că având un număr suficient de mare de puncte experimentale (situri explorate), rezultatele se pot trata statistic. În plus, dacă forțăm $S = 1$, algoritmul S-on-1 devine 1-on-1, deci procedura 1-on-1 o putem considera ca fiind inclusă în procedura (generală) S-on-1. Acestea sunt motivele pentru care la baza funcționării instalației se află algoritmul S-on-1. Algoritmii și modul de operare al stației au fost publicate în rapoartele de cercetare ale proiectului ISOTEST (<http://ssll.inflpr.ro/isotest/index.htm>).

Funcționarea instalației este structurată pe nouă etape succesive, după cum urmează:

- a. Pornire echipamente și inițializare;
 - b. Caracterizare fascicul laser și calibrare atenuator;
 - c. Centrare probă în fascicul;
 - d. Realizare harta situri;
 - e. Testare preliminară (realizată de operator);
 - f. Testare automată;
 - g. Marcare probă;
 - h. Calcul curbe și bugetul erorilor;
 - i. Salvare date și întocmirea raportului de test;
- Operatorul definește o serie de q intervale de energie $[Q_i - \Delta Q, Q_i + \Delta Q]$ care acoperă gama de energie laser per puls disponibilă pentru test, unde i este o variabilă care numerotează aceste intervale, $i = 1; 2; \dots q$. Semilargimea intervalelor, ΔQ , se menține

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser

constantă pe durata testului și determină eroarea statistică a valorii pragului de distrugere (Fig. 3.4). Dacă Q_{min} este nivelul minim de energie accesibil experimental, atunci Q_i , energia medie a intervalelor succesive de lărgime $2\Delta Q$, este data de relația

$$Q_i = Q_{min} + (i - 0.5) \cdot 2\Delta Q \quad (3.2)$$

Valorile Q_{min} , ΔQ , q sau Q_{max} sunt setate de operator.

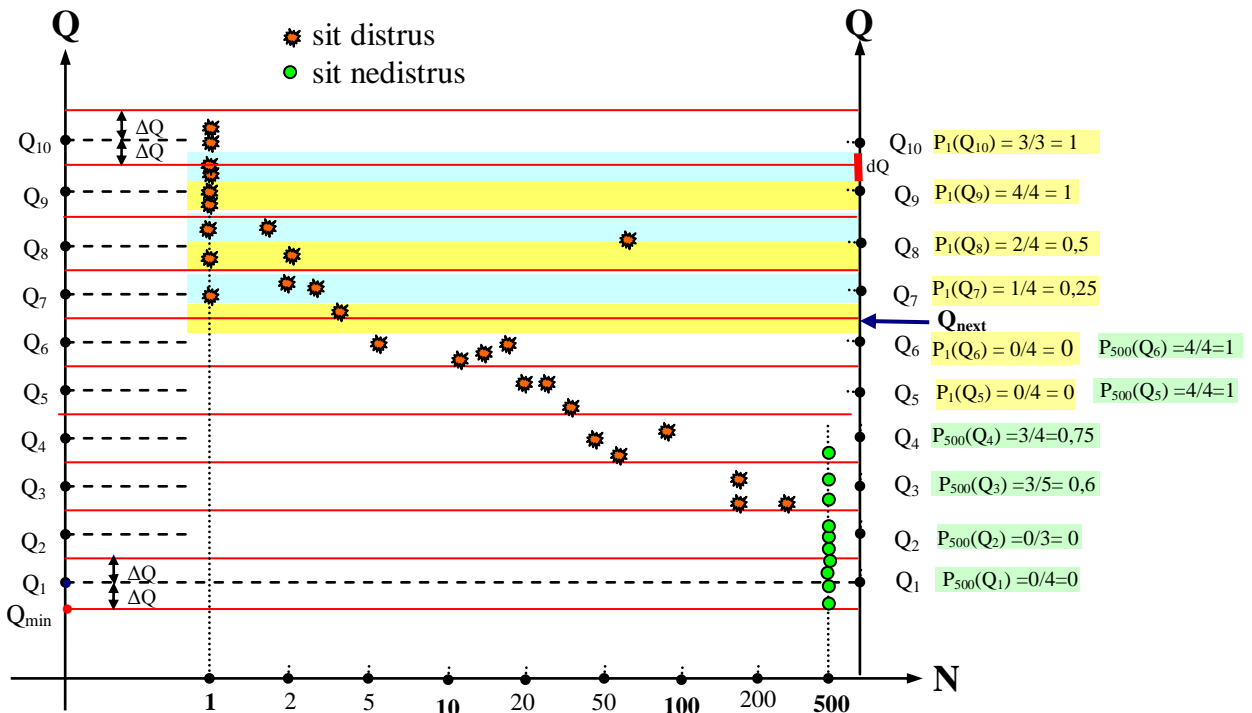


Fig. 3.1. Reprezentarea siturilor interogate în diagrama Q – N după etapa de inițializare.

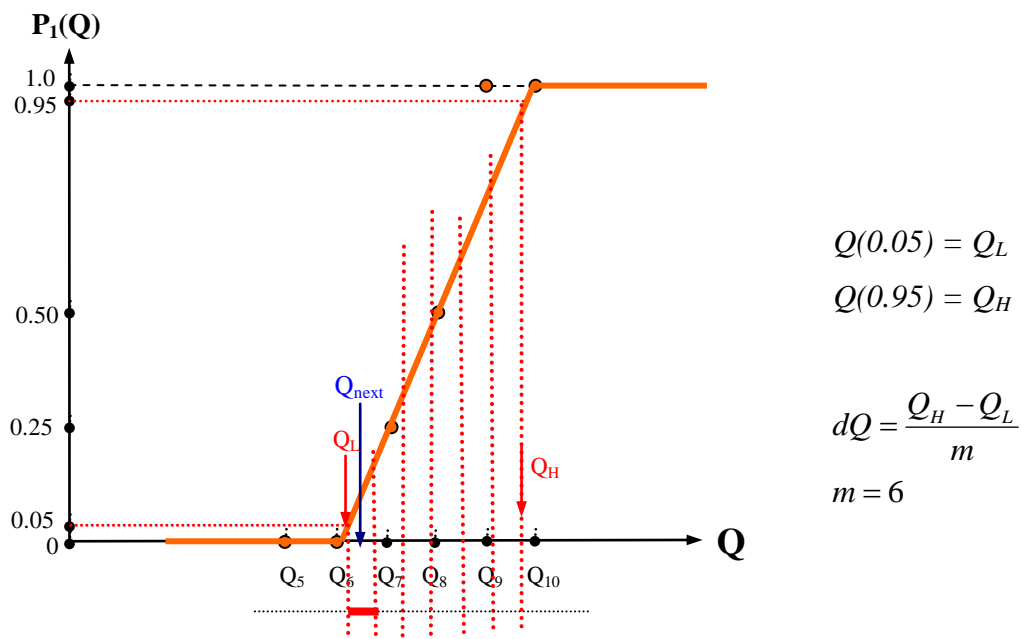


Fig. 3.2. Caracteristica de probabilitate $P_1(Q)$ fitată de algoritmul cu datele din Fig. 3.4.

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser

Q_L , Q_H : energia per puls corespunzătoare probabilității de distrugere de 5% , respectiv 95 %;

Q_{next} , energia pulsului laser calculată de algoritm pentru interogarea sitului următor.

Q , energie per puls laser; N , număr de pulsuri aplicate per sit;

$P_N(Q)$, probabilitatea de distrugere a unui sit la N pulsuri aplicate per sit;

Q_{next} , energia pulsului laser calculată de algoritm pentru interogarea sitului următor.

3.4. Contribuții personale

Am optimizat implementarea algoritmului de operare al stațiilor automate de determinare a PDCL pentru a obține o eroare minimă cu un număr mic de puncte experimentale. Implementarea a fost realizată după indicațiile din standardul ISO 21254 și programul software de sine stătător care a rezultat din această implementare funcționează în conformitate cu acest standard. Implementarea acestui algoritm pentru funcționarea automată a fost necesară din cauza timpului foarte mare necesar pentru efectuarea unui astfel de test. Prin implementarea secvenței automate a programului de operare timpul dedicat unui test obișnuit a scăzut de la câteva zile (2-3 zile în regim complet manual) la numai câteva ore (cu regimul automat).

Am stabilit protocolul de pornire și initializare a echipamentelor și dispozitivelor componente ale stațiilor, necesar pentru o funcționare corectă a instalațiilor. Am dezvoltat protocolul de centrare a probelor în fascicul, protocol necesar pentru a putea testa probe de diferite forme și dimensiuni cu aceste instalații; centrarea probei este necesară pentru a obține suprapunerea hărții realizată în software-ul de operare cu suprafața optică a probei.

Pe baza implementării unității de calcul pentru procese rapide (DSP) în stația automată pentru măsurarea PDCL a fost depusă o cerere de brevet de invenție la *Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci* cu numele și numărul: *Dispozitiv integrat în Stație Automată de măsurare ISO a pragului de distrugere a componentelor optice iradiate cu laser*; A / 00425 din 13.06.2012

4. Detecția în timp real a defectelor induse pe suprafețe optice

În acest capitol voi prezenta rezultate privind dezvoltarea și implementarea unei tehnici și a unui dispozitiv de detecție în timp real a distrugerii induse de laser pe suprafețe optice. Dispozitivul este integrat în două stații automate pentru măsurarea pragului de distrugere indus de laser, conform standardelor ISO. Rezultatele originale ale acestei implementări au fost publicate/prezentate în [L2], [C14].

4.1. Rezultate experimentale

Ieșirea detectorului de distrugere (DDS) este conectată la un procesor digital de semnale (DSP). Pe scurt unitatea DSP este “creierul” secvențelor rapide a procedurii S-on-1 și care lucrează în timp real (real-time, adică timpul de răspuns este total predictibil): decizia că semnalul de la detectorul de distrugere a depășit pragul stabilit și blocarea iradierii suprafeței cu pulsurile laser ulterioare acestui moment.

Sistemul optic de colectare a radiației este prezentat în Fig. 4.4. Lentila L1 colectează și colimează radiația împrăștiată de suprafață optică testată. Pentru a colecta o fracțiune cât mai mare din radiația împrăștiată, folosim o lentilă cu o apertură numerică mare $NA \approx 0.3$. Sistemul a fost proiectat astfel încât să poată fi poziționat cu planul focal al lentilei L1 pe situl testat pe probă. Un filtru interferențial cu banda de 10 nm la lungimea de undă centrală de 1064 nm a fost pus după prima lentilă colectoare din cauză că acest filtru funcționează corect când radiația este colimată. Lentila L2 concentrează fasciculul colimat de lentila L1 pe aria activă a fotodiodei. Un filtru neutru adecvat este adăugat pentru a ajusta curentul prin fotodiodă la o valoare rezonabilă.

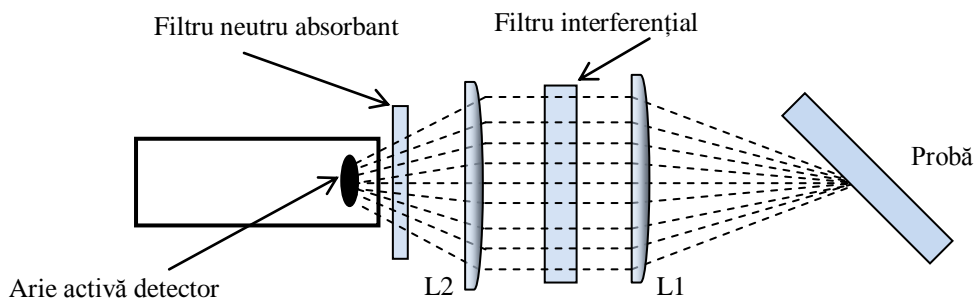


Fig. 4.1. Schema sistemului optic de detecție a defectelor.

L1 – lentila de colectare/de colimare; L2 – lentila de focalizare.

Pentru a crește sensibilitatea (rezoluția) detectorului de distrugere și pentru a elimina zgomotul sincron de frecvență înaltă, am conectat ieșirea fotodiodei la un amplificator de semnal care funcționează și ca filtru trece-jos.

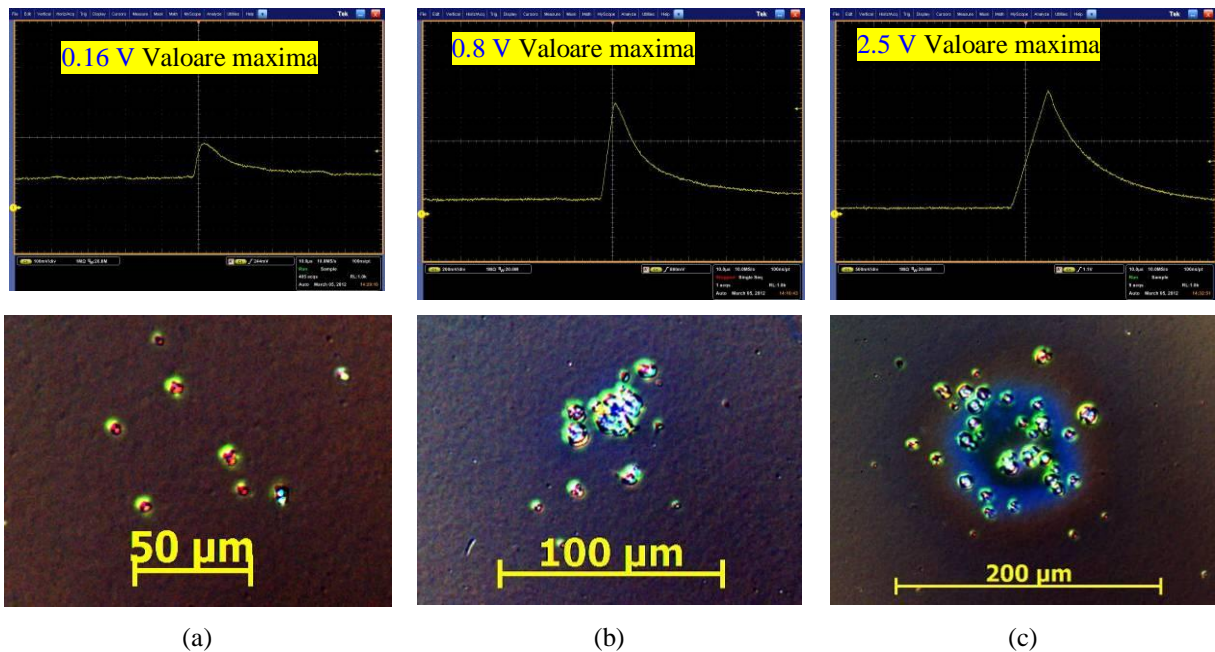


Fig. 4.2. Semnalul de ieșire al detectorului de defecte pentru diferite nivele de fluență, exprimată ca fluență maximă H_{max} în planul probei.

Pe primul rând sunt afișate semnalele de ieșire DDS.

Pe rândul al doilea imagini Nomarski cu magnificare $200 \times$ ale siteurilor distruse.

4.2. Contribuții personale

Am proiectat și dezvoltat o tehnică și un dispozitiv rapid și simplu de utilizat pentru detecția defectelor induse de laser pe suprafețele optice testate. Tehnica este bazată pe monitorizarea radiației împrăștiată de probă la un unghi de incidență între $\approx 15^\circ \div 75^\circ$, radiația împrăștiată detectată provenind de la laserul de test după apariția unui defect pe suprafața probei. Rezultatele experimentale au arătat o rezoluție mare a detectorului, sensibilitate mare a detectorului la apariția unui defect, capacitate de a lucra la frecvențe mari de repetiție ale laserului de test, o funcționare stabilă și sigură a detectorului de sit distrus. Acest detector de distrugere a siturilor este implementat pe cele două stații de determinare a pragului de distrugere în câmp laser descrise în capitolele 2.1 și 2.2 și funcționează conform recomandărilor standardului ISO 21254 - 4. Rezultatele au fost publicate în articolul “**Real-time detection of optical damage induced by high-power laser pulses**” [15].

5. Măsurarea ariei efective a fasciculelor laser în planul probei

În acest capitol voi prezenta o metodă de măsurare în timp real a ariei efective într-un anumit plan transversal, de-a lungul unui fascicul produs de un laser cu emisie în impulsuri. Aria efectivă a unui fascicul în planul țintei este un parametru fundamental pentru caracterizarea pragului de distrugere în câmp laser al componentelor și materialelor optice, în conformitate cu standardul ISO 21254 – 1, 2, 3, 4. Influența energiei de fond și influența ariei de integrare asupra acurateții măsurării valorii ariei fasciculului a fost simulată și analizată în programul software Matlab. Metoda a fost aplicată pentru măsurarea a diferite profile transversale de fascicul ale unui laser de tip Nd:YAG cu următoarele caracteristici: lungimea de undă de 1064 nm, durata de puls 5 ns, frecvența de repetiție de 10 Hz. Am estimat pentru aceste măsurări incertitudinea standard.

5.2. Metoda de măsurare

Conform standardelor ISO 21254, raportul dintre energia totală a pulsului Q și fluența maximă H_{max} este definită ca aria efectivă A_{eff} a unui fascicul laser:

$$A_{eff} = Q/H_{max} \quad (5.1)$$

$$A_{eff} = \frac{a_{pixel} \sum_X \sum_Y V_{XY}}{V_{max}} \quad (5.6)$$

Diametrul efectiv este prin definiție, diametrul unui fascicul fictiv, circular cu aceeași arie efectivă ca și fasciculul real, sau:

$$d_{eff} = 2\sqrt{A_{eff} / \pi} \quad (5.7)$$

5.3. Simulări Matlab

În această secțiune este descrisă abordarea proprie de simulare a erorilor ce influențează măsurarea ariei efective. Parametrii care consider că sunt principali contributori la eroarea de măsură pe asamblu sunt:

- zgomotul de fond al camerei CCD; am împărțit zgomotul de fond în două componente cu contribuții independente:
 - o componentă cu distribuție gaussiană a valorilor de amplitudine și medie zero (zgomot alb gaussian, WGN), cu o valoare RMS a amplitudinilor σ_{noise} .
 - și o componentă continuă (offset), reprezentând valoarea medie pe fiecare pixel al camerei Δ_{offset} .
- diametrul de fascicul d_{eff} , atunci când este prea mic
- factorul de multiplicare k al aperturii software

- gama dinamică a camerei (DR), sau rezoluția Convertorului Analog-Digital (ADC)

5.3.2. Eroarea introdusă de zgomotul alb gaussian

Eroarea ϵ_{noise} introdusă de zgomotul cu componentă medie zero este calculată pentru toate gamele utile ale parametrilor d_{eff} , DR, și n , și considerând $d_{\text{ap}} = k_{\text{min}} \times d_{\text{eff}}$ și $\Delta_{\text{offset}} = 0$. Rezultatele sunt prezentate în graficele din Fig. 5.6 e, unde se poate observa că eroarea ϵ_{noise} crește ușor odată cu diametrul de fascicul, toți ceilalți parametri rămânând constanți. Această dependență este explicată în felul următor: ϵ_{noise} este calculat combinând erorile relative ale valorilor indicate de Total și Peak din Ec. (5.6). În timp ce valoarea $\sum_X \sum_Y V_{XY}$ este afectată foarte puțin de zgomot, deoarece prin efect de mediere pe pixelii din apertură, contribuția devine practic nulă, pixelii cu valori mari (apropiate de valoarea maximă) sunt puternic afectați de valorile izolate de mare amplitudine ale zgomotului. Și din cauză că, cu cât avem un diametru mai mare de fascicul cu atât mai mulți pixeli vom avea cu valori apropiate de valoarea V_{max} , și cu atât mai mare va fi probabilitatea ca unul dintre pixeli să fie afectat de o valoare numerică mare a zgomotului.

Zgomotul de fond poate fi considerat principalul factor contributor la valoarea parametrului α (limita de convergență). Nivelul de fundal constant (offset) are o contribuție neglijabilă în procedura iterativă de măsură, deoarece el adăugă cantități constante atât la valoarea totală a energiei cât și la valoarea maximă.

De notat că nivelul de fundal constant afectează mai mult distribuția gaussiană, contribuția lui scăzând pe măsură ce ordinul super-gaussienei crește, în condițiile măsurării cu aceeași valoare a gamei dinamice.

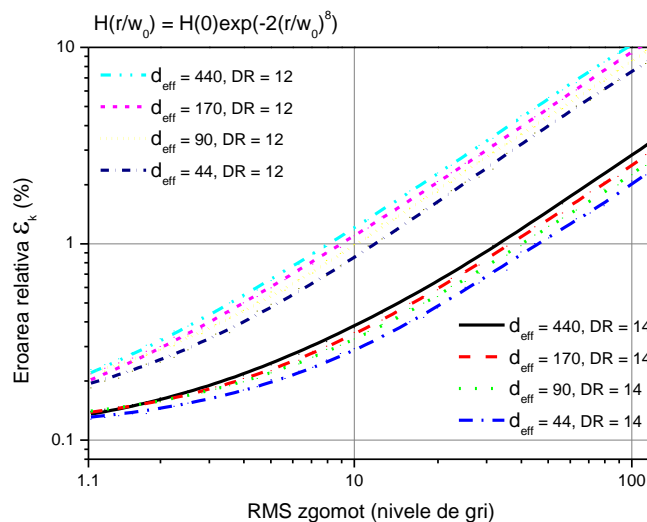


Fig. 5.1. Eroarea relativă ϵ_{noise} în funcție de amplitudinea zgomotului pentru profil super-gaussian cu $n = 8$;

5.5. Rezultate experimentale

Am măsurat aria efectivă a trei fascicule laser cu profile și dimensiuni diferite, după cum sunt prezentate în Fig. 5.9.

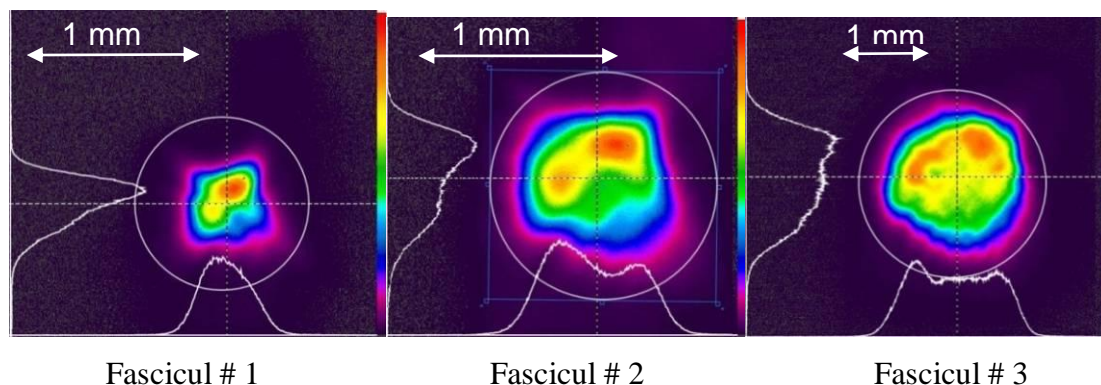


Fig. 5.2. Profile spațiale 2D ale fasciculelor măsurate.

Rezultatele obținute prin aplicarea metodei descrise anterior sunt sumarizate în Tabelul 5.2 de mai jos

Tabelul 5.2. Măsurări ale ariei efective: rezultate experimentale și bugetul erorilor.

Parametru	Fascicul # 1	Fascicul # 2	Fascicul # 3
$\tilde{A}_{\text{eff-meas}} \text{ (cm}^2\text{)}$	0.11	0.26	1.3
$d_{\text{eff}} \text{ (}\mu\text{m/pixels)}$	380/86	580/132	1290/293
$u_A \text{ (}\%\text{)}$	0.9	0.7	0.7
$\tilde{V}_{xy} \text{ (grey levels)}$	2010	3796	5081
$\sigma_{\text{noise}} \text{ (grey levels)}$	16		
$\Delta_{\text{offset}} \text{ (grey levels)}$	5		
$\epsilon_{\text{noise}} \text{ (}\%\text{)}$	0.3	0.4	0.5
$\epsilon_{\text{offset}} \text{ (}\%\text{)}$	~ 0	~ 0	~ 0
$\epsilon_{\text{contrast}} \text{ (}\%\text{)}$	0.05	0.026	0.02
$\epsilon_{\text{pixel}} \text{ (}\%\text{)}$	2.3	1.5	0.7
$\epsilon_{\text{linear}} \text{ (}\%\text{)}$	1		
$u_{\text{method}} \text{ (}\%\text{)}$	2.5	1.85	1.32
u_C	2.7	1.98	1.5
$U \text{ (}\%\text{)}$	5.4	3.96	3

5.6. Contribuții personale

Aria efectivă este un parametru fundamental care caracterizează spațial iradianța profilului de fascicul laser într-un plan transversal. Deoarece aria efectivă este legată direct de fluența de vârf și de energia pulsului laser, este aplicabilă oricărui profil spațial real de fascicul.

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser

În acest capitol am prezentat o modalitate de a măsura în timp real aria efectivă a unui fascicul într-un plan de interes definit (de exemplu planul probei), în conformitate cu definiția din standardul ISO a acestui parametru. Metoda folosește un analizor de fascicul pe bază de camera CCD și este aplicabilă în domeniul ultraviolet până în infraroșu apropiat. Efectul energiei de fundal și acuratețea metodei au fost evaluate prin simulări numerice în programul software Matlab.

Simulările Matlab au arătat o caracteristică particulară surprinzătoare a măsurării ariei efective: pentru un zgomot de fundal constant, eroarea de măsură a ariei devine mai mare pentru diametre de fascicul mai mari. Acest lucru este contrar așteptărilor, deoarece un fascicul mai mare se presupune că este mai bine măsurabil.

Am aplicat această metodă pentru a măsura aria efectivă a trei profile de fascicul laser de dimensiuni diferite, la lungimea de undă de 1064 nm. Am folosit un analizor de fascicul cu senzor CCD cu o arie de 1200×1600 pixeli cu o gamă dinamică de 14 biți (16 384 nivele de gri), pentru diametre de fascicul de sute de pixeli. Incertitudinea extinsă a măsurărilor a fost calculată, obținând o valoare de $\sim 3\%$.

Că o concluzie generală, acuratețea metodei descrise mai sus depinde în principal de doi factori: caracteristicile camerei CCD (contrast, rezoluție spațială, gama dinamică, eficiența algoritmului de anulare a zgomotului) și de dimensiunea fasciculului măsurat în raport cu dimensiunea senzorului CCD.

Din literatura analizată nu există studii asemănătoare cu cele prezentate în acest capitol (analiza comportamentului ariei și diametrului efectiv în condiții de laborator și o metodă de măsurare și evaluare a incertitudinii măsurării).

Rezultatele originale din acest capitol au fost prezentate în [C10] și [C12] și într-un articol submis la revista Optical Engineering cu numărul 140540SS..

6. Măsurarea duratei efective a pulsurilor laser de ordinul nanosecundelor și femtosecundelor

În acest capitol voi descrie metoda utilizată pentru a măsura parametrul numit *durata efectivă a pulsului laser* așa cum este definit în standardul ISO 21254-1:2011. Abordarea este aplicată pentru a măsura pulsurile surselor laser folosite în cele două stații automate de măsurare a PDCL. Sunt prezentate analiza și descrierea procesului de măsurare, rezultatele experimentale, precum și incertitudinile aferente. O incertitudine combinată mai mică se

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser obține pentru durata efectivă a pulsului decât pentru durata la semi-înălțime a pulsurilor pentru fiecare scală de timp descrisă în experimente.

Acest lucru sugerează faptul că durata efectivă a pulsului este un parametru adecvat pentru a caracteriza durata pulsurilor în experimentele de determinare a pragului de distrugere în câmp laser.

6.2. Definierea duratei efective a pulsurilor laser și principiul de măsurare

6.2.1. Definiție

Un puls este un eveniment temporal care durează un anumit timp. Noile standarde ISO 21254 și fostul standard ISO 11254, care se ocupă cu metodele de testare pentru determinarea pragului de distrugere în câmp laser a componentelor optice, au introdus un parametru cu caracter de medie care caracterizează lungimea temporală a impulsului, numit durata efectivă a pulsului, notată t_{eff} . Durata efectivă a unui puls laser este definită ca raportul dintre energia totală a pulsului, Q , raportată la puterea de vârf, P_{pk} ,

$$t_{eff} = Q/P_{pk} \quad (6.1a)$$

unde energia totală a pulsului laser este definită ca fiind integrala în funcție de timp a puterii optice a unui singur puls laser $P(t)$, și t este variabilă independentă,

$$Q = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (6.1b)$$

Matematic durata efectivă reprezintă o medie pe întreaga durată a pulsului, adică, durata unui puls ipotetic dreptunghiular având aceeași energie totală și același maxim al puterii ca pulsul real. Fig. 6.1 reprezintă definiția parametrului t_{eff} pentru o anumită formă de puls, în comparație cu durata la semi-înălțime a aceluiasi puls. Această definiție este justificată prin ipoteza că mecanismul de distrugere indus de pulsul laser, deși este inițiat de

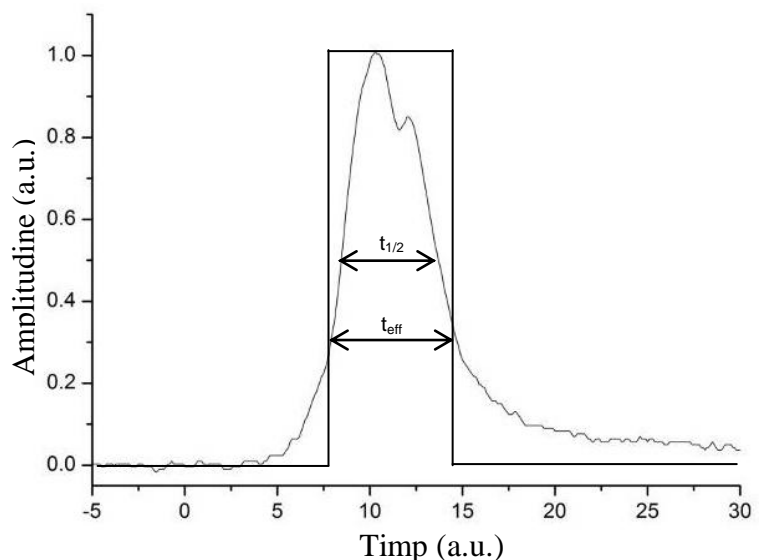


Fig. 6.1. Reprezentarea grafică a duratei efective, t_{eff} și a duratei la semi-înălțime (FWHM), $t_{1/2}$ a pulsurilor

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser puternic, este în principal un rezultat mediu al interacției dintre pulsul laser și materialul testat.

6.2.2. Principiul de măsurare

Procedeul de măsurare are doi pași principali. În prima etapă, pe care o vom numi convențional etapa de achiziție de date, întreaga distribuție energetică a profilului temporal a unui singur puls (sau a unei secvențe de pulsuri aproape identice) este măsurată, afișată și înregistrată, obținând astfel forma pulsului $i(t)$ definită de Ec. (6.2) ca o funcție continuă în timp. În etapa a doua, pe care o vom denumi etapa de procesare, un profil de puls tipic $i_{tp}(t)$ este obținut din câteva profile $i(t)$ prin medierea datelor experimentale, și mai departe acest profil este procesat numeric pentru a calcula t_{eff-tp} utilizând Ec. (6.3b). Etapa a doua este făcută cu un software adițional, în afara sistemelor de detecție (offline), în cazul nostru se folosește MATLAB®.

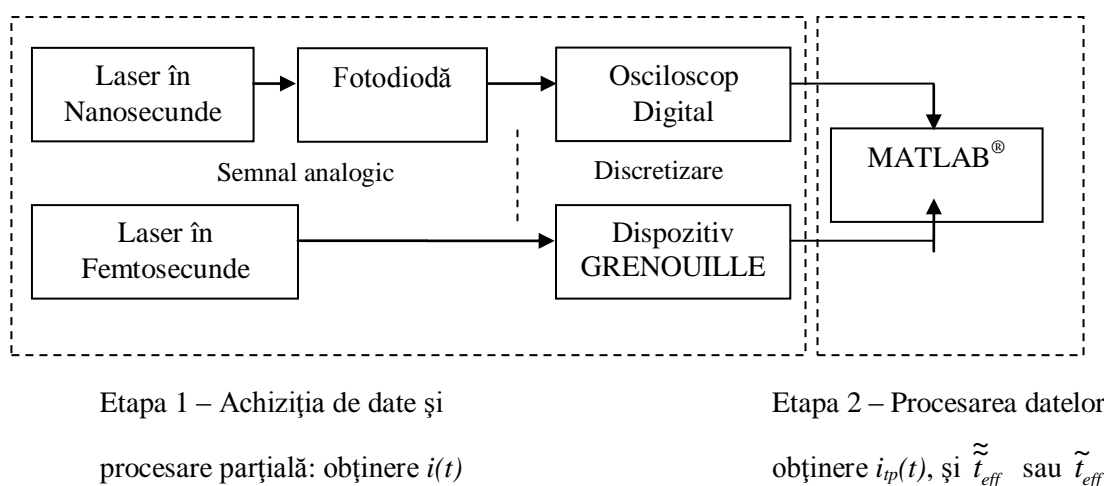


Fig. 6.2. Diagrama principiului de măsurare pentru t_{eff} . Etapa 1 corespunde achiziției de date și o procesare parțială pentru obținerea formei pulsului $i(t)$. Etapa 2 corespunde procesării datelor achiziționate printru obținerea pulsului tipic $i_{tp}(t)$, medierii rezultatelor duratei efective a pulsurilor, \tilde{t}_{eff} (pentru pulsurile de nanosecunde) sau \tilde{t}_{eff} (pentru pulsurile de femtosecunde), și incertitudinile combinate asociate u_C .

6.3. Scala de nanosecunde

6.3.3. Rezultate experimentale: măsurări directe și diverse medieri

Am aplicat procedura cu precauțiile menționate mai sus pentru măsura durată efectivă a unei surse laser tip Brilliant B10-SLM (Quantel).

Toate măsurările și rezultatele descrise în această subsecțiune și în următoarea sunt obținute utilizând numai pulsuri tipice. Fiecare profil de puls tipic reprezintă media numerică a $N = 50$ de profile laser succesive. Pentru a simplifica notațiile pentru diferite medieri vom introduce mai jos subscriptul „-tp” pentru parametrii asociați unui puls tipic.

Gama dinamică utilizabilă a sistemului de detecție, după cum este descris în C3, a fost evaluată prin măsurarea duratei la semi-înălțime, $t_{1/2}$, a unui profil tipic de puls, în funcție de valoarea maximă a răspunsului fotodiodei, V_{pk} . Fig. 6.4 prezintă măsurarea valorilor $t_{1/2}$ și t_{eff} versus semnalul maxim V_{pk} . Gama liniară a fotodiodei se întinde de la valori de 90 mV până la 850 mV. În această gamă $t_{1/2}$ are o valoare medie de $\bar{t}_{1/2} = 4.45$ ns, cu o abatere standard de $\sigma_{1/2} \approx 1\%$, și t_{eff} are o valoare medie $\bar{t}_{eff} = 5.76$ ns, cu o abatere standard de $\sigma_{eff} \approx 1\%$. Curba t_{eff} versus V_{pk} a fost obținută folosind Ec. (6.5)-(6.10) în conformitate cu C4 menționat mai sus. De observat în Fig. 6.4 îndepărtarea mai puternică de valorile mediilor lor a valorilor t_{eff} comparativ cu $t_{1/2}$ pentru o valoare a V_{pk} mai mare decât gama de liniare a fotodiodei.

În consecință, vom considera în experimentele noastre o valoare a V_{pk} în mijlocul gamei de liniaritate adică, $V_{pk} \approx 400$ mV este o valoare bună de lucru.

Pentru a crește precizia măsurărilor lui t_{eff} , zece pulsuri tipice sunt măsurate independent utilizând condițiile și procedurile de corecție de la C3 și C4 menționate mai sus (adică o valoare constantă a V_{pk} apropiată de 400 mV și aplicând corecțiile pentru zgomot și nivel continuu).

Rezultatul mediat al acestor zece măsurări, notat cu \tilde{t}_{eff} , are valoarea de 5.80 ns cu o abatere standard relativă de $\sigma_{teff} \approx 0.5\%$. Am măsurat, de asemenea, timpul de creștere, t_{r-meas} , și timpul de descreștere, t_{f-meas} , ale unui puls tipic, pentru a fi utilizate mai departe în calculul

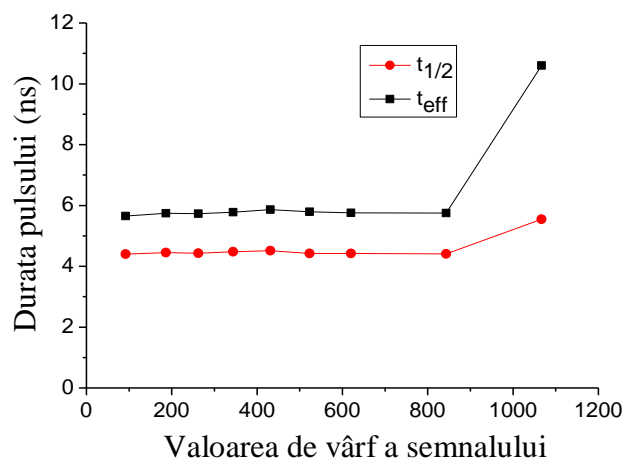


Fig. 6.3. Durata la semi-înălțime (FWHM), $t_{1/2-tp}$, și durata efectivă, t_{eff-tp} , a profilului tipic de puls versus valoarea de vârf a semnalului măsurat, V_{pk-tp} . Valorile medii în gama de liniaritate a fotodiodei sunt $\bar{t}_{1/2} = (4.45 \pm 0.05)$ ns, respectiv $\bar{t}_{eff} = (5.76 \pm 0.06)$ ns.

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser erorilor, și am obținut $t_{r\text{-meas}} = 2.9$ ns, și $t_{f\text{-meas}} = 6.4$ ns. Prin aplicarea mai departe a corecțiilor, descrise în secțiunea următoare, rezultatul final, adică, durata efectivă a pulsului corectată (mediată pe zece profile de puls tipic), notată cu \tilde{t}_{eff} , este obținut. Timpul de descreștere $t_{f\text{-meas}}$ este semnificativ mai mare decât timpul de creștere măsurat $t_{r\text{-meas}}$ și, deci, influența sa asupra acurateții măsurărilor a fost neglijat. Altfel, corecțiile pentru \tilde{t}_{eff} trebuie să includă și contribuția timpului de descreștere.

6.4. Scala de femtosecunde

6.4.2. Măsurarea duratei efective a pulsurilor cu GRENOUILLE

Pentru a măsura pulsurile produse de laserul cu emisie în sute de femtosecunde utilizăm un dispozitiv GRENOUILLE 8-50 (Swamp Optics), cu următoarele caracteristici principale: gama de lungimi de undă 700 nm – 1100 nm; gama de durate de puls 50 fs – 500 fs; rezoluția spectrală 2 nm; acuratețea intensității $i(t)$ - 2%; acuratețea fazei $\phi(t)$ - 0.01 rad; sensibilitate (la 1 kHz frecvență de repetiție a pulsurilor) - 100 μ W (100 nJ); starea de polarizare necesară la intrare - liniară.

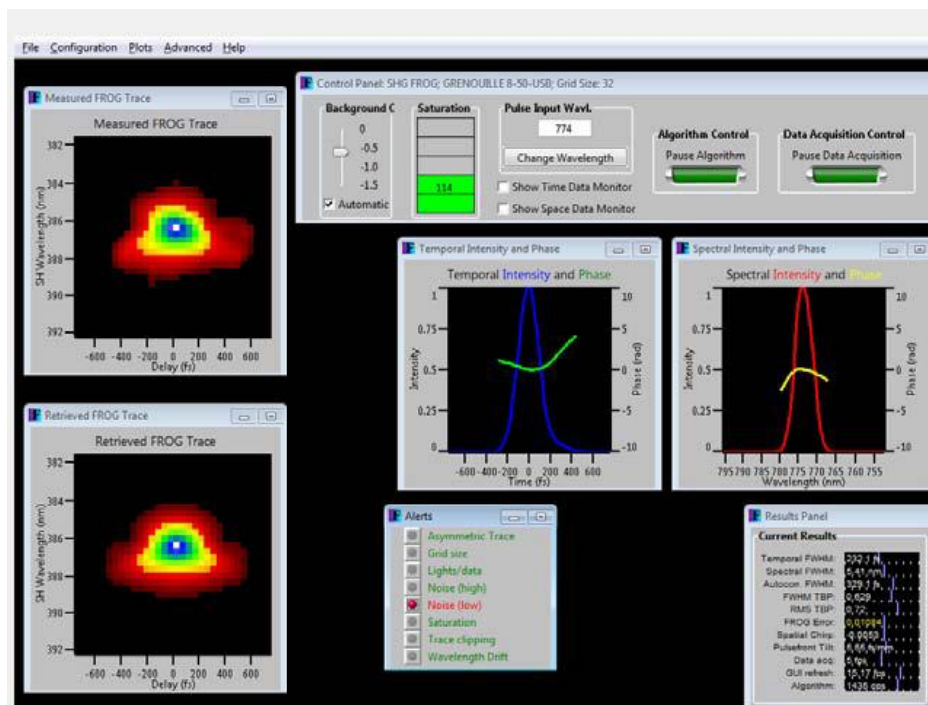


Fig. 6.4. Interfața grafică Grenouille cu rezultatele măsurării pulsurilor de femtosecunde emise de laserul Clark 2101. Stânga: Trasa măsurată (sus); Trasa reconstituită (jos); Dreapta: profilul temporal de intensitate (albastru), Faza temporală (verde); Intensitatea spectrală (roșu); Faza spectrală (galben); Jos: detaliu cu rezultatele măsurării.

- Etapa a doua a procesului de măsurare constă în obținerea formei tipice de puls, $i_{tp}(t)$, prin medierea datelor a N trase și procesarea datelor pentru obținerea t_{eff-tp} .

Rezultatele finale sunt:

$\tilde{t}_{eff} = 280 \text{ fs} \pm 14 \text{ fs}$ sau $\tilde{t}_{eff} = 280 \text{ fs} \pm 5 \%$. Similar, pentru durata la semi-înălțime obținem $u_{Ct1/2} \approx 7 \%$ și valorile $\tilde{t}_{1/2} = 260 \text{ fs} \pm 18 \text{ fs}$, sau $\tilde{t}_{1/2} = 260 \text{ fs} \pm 7 \%$.

6.5. Contribuții personale

Am prezentat în acest capitol măsurări de determinare a duratei efective a pulsurilor laser în gamă de durate de puls de nanosecunde și femtosecunde. Acest parametru este recomandat de standardul ISO 21254-1 să fie folosit pentru experimente de caracterizare a PDCL. Pentru comparație, am măsurat și durata la semi-înălțime a aceluiași pulsuri. Precizia măsurărilor depinde puternic de stabilitatea formei de undă a pulsului, pe când acuratețea rezultatului este în principal limitat de banda finită a sistemului de măsură (fotodiodă și osciloscop pentru pulsurile de nanosecunde) și erori caracteristice ale dispozitivelor GRENOUILLE (pentru pulsurile de femtosecunde). În ambele regimuri temporale incertitudinea standard relativă calculată pentru durata efectivă a pulsurilor este mai mică decât incertitudinea similară calculată pentru durata la semi-înălțime, $u_{Cteff} \approx 0.5 \%$ pentru pulsurile laser de nanosecunde și $u_{Cteff} \approx 5 \%$ pentru pulsurile de la laserul în femtosecunde. În comparație, măsurările duratei la semi-înălțime prezintă o incertitudine combinată relativă standard $u_{Ct1/2} \approx 1 \%$ pentru pulsurile de nanosecunde și $u_{Ct1/2} \approx 7 \%$ pentru pulsurile de femtosecunde. Faptul că durata efectivă măsurată a pulsurilor laser are o incertitudine combinată mai mică decât durata la semi-înălțime pentru ambele scale de timp ne indică faptul că durata efectivă este un parametru adecvat în locul duratei la semi-înălțime ca parametru principal în experimentele de determinare a PDCL.

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în [L1] **A. Zorilă**, L. Rusen, A.

Stratan, G. Nemeș, *Measuring the effective pulse duration of nanosecond and femtosecond laser pulses for laser-induced damage experiments* Opt. Eng. 52 (5), 054203 (May 31, 2013); și în [C9].

7. Studii și măsurări ale pragului de distrugere în câmp laser

În prezent, laboratorul ISOTEST este singurul laborator din România (și chiar din sud-estul Europei) unde se pot face studii și măsurări ale pragului de distrugere în câmp laser al componentelor și materialelor optice la standarde ISO. Pe baza acestor facilități contruite,

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser
laboratorul ISOTEST a depus documentația tehnică necesară acreditării de către RENAR, iar
procesul de evaluare al laboratorului este în desfășurare în prezent.

Studiile și măsurările efectuate cu cele două stații automate pentru determinarea pragului de
distrugere în câmp laser prezentate în acest capitol sunt o premieră la nivelul României, iar
studiul de intercomparare („round-robin”) cu 2 laboratoare (cele mai renumite la nivel
European): Characterization Group, Laser Zentrum Hannover e.V. și Laser Research Center,
Vilnius University reprezintă o atestare la nivel internațional a rezultatelor măsurărilor din
acest laborator.

În primul paragraf al acestui capitol voi prezenta un scurt rezumat al mecanismelor de
distrugere în câmp laser pentru regimurile de lucru ale laserilor folosiți în stațiile automate
urmat de o evaluare a incertitudinii totale a măsurărilor PDCL.

În continuare voi prezenta o analiză a PDCL-ului componentelor și acoperirilor optice
măsurate și a incertitudinii totale asociată acestor măsurări. Măsurări efectuate pe cele două
stații automate.

În încheierea acestui capitol voi prezenta testul de intercomparare („round-robin”) cu 2
laboratoare (cele mai renumite la nivel european): Characterization Group, Laser Zentrum
Hannover e.V. și Laser Research Center, Vilnius University.

Unele rezultate din acest capitol au fost publicate și în rapoartele de cercetare ale proiectului
ISOTEST (<http://ssl.inflpr.ro/isotest/index.htm>).

7.1. Mecanisme de distrugere

Când radiația electromagnetică incidentă pe un material atinge un anumit prag critic al
fluentei (PDCL) apar, între radiație și material, unele interacții catastrofice și ireversibile.
Defectele apărute în urma acestei interacții pot să apară pe fețele materialului (pe fața
anterioară sau posterioară în raport cu direcția fasciculului laser), la interfața dintre două
componente sau în volum.

Mecanismele de distrugere se pot împărți în două mari categorii:

I. Distrugerii apărute în urma proceselor termice, care au loc datorită absorbției de
energie în material. Aceste procese au loc de obicei pentru laseri cu operare în undă continuă,
sau durate de puls mari (nanosecunde, microsecunde) și frecvențe mari de repetiție.

La un anumit nivel de stres termic, nivel mai mare decât forțele de adeziune dintre acoperire
și suprafața substratului, acoperirea cedează și se poate exfolia [16], așa cum este arătat în
Fig. 7.1. În alte cazuri energia termică absorbită atinge pragul de topire al materialului
acoperirii și apare evaporarea acesteia sau își modifică structura cristalină (uneori această

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser
 modificare este doar o schimbare a indicelui de refracție, care apare ca o ușoară modificare a
 culorii acoperirii). Acest tip de defect este prezentat în Fig. 7.2

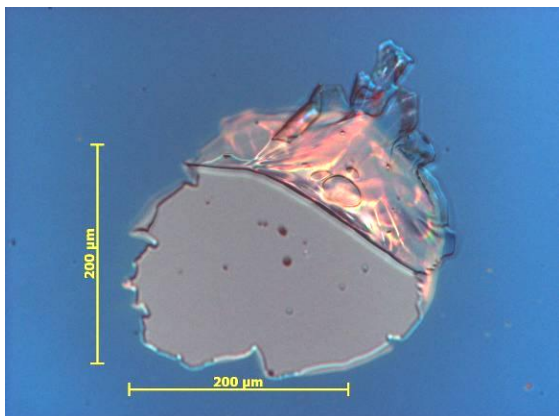


Fig.7.1. Micrografie Nomarski (mărire 200 ×)
 a unui sit distrus pe o acoperire AR,
 defect după 1 puls, fluența 30 J/cm^2 ,
 diametru efectiv 0.23 mm,
 durata efectivă a pulsului de 6.4 ns.

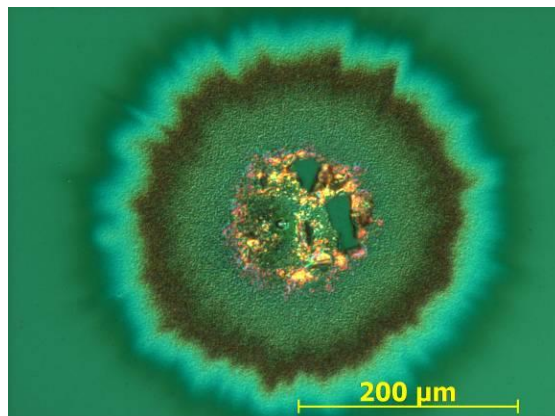


Fig.7.2. Micrografie Nomarski (mărire 500 ×)
 a unui sit distrus pe o oglindă HR 1064 nm,
 defect după 1 puls, fluența 121 J/cm^2 ,
 diametru efectiv 0.20 mm,
 durata efectivă a pulsului de 6 ns.

II. A doua clasă este formată din procese dielectrice [17, 18, 19, 20, 21], procese care apar atunci când densitatea câmpului electric incident pe material este suficient de mare pentru a dizloca electronii din rețeaua cristalină. Aceste procese apar la durate de puls suficient de scurte (picosecunde, femtosecunde) pentru a crea ionizare în avalanșă [22, 23, 24] și când absorbția termică este suficient de scăzută pentru a favoriza ionizarea. Cu alte cuvinte atunci când pragul de distrugere datorat ionizării este mai mic decât pragul de distrugere datorat acumulării de energie termică.

Nu se poate specifica o singură valoare a LIDT pentru un anumit material, fără a se specifica lungimea de undă, durata efectivă a pulsului, aria efectivă a fasciculului forma de fascicul [25], etc. De asemenea, la nivel de structura micrometrică a suprafeței toate probele sunt mai mult sau mai puțin diferite și aceste diferențe duc la diferențe între valorile măsurate ale PDCL. Pragul de distrugere este, prin urmare, caracteristic unei anumite componente și nu este suficient ca PDCL să fie menționat într-o anumită unitate de măsură (de exemplu J/cm^2 , sau MW/cm^2) fără a se menționa și condițiile de măsurare: lungime de undă, durată pulsului, aria în planul probei [26].

O parte din energia stocată în câmpul undei electromagnetice este transferată electronilor din rețeaua cristalină în timpul interacției laser-materie. Energia transferată electronilor este apoi disipată în rețeaua cristalină. Cantitatea de energie transferată este direct proporțională cu timpul de interacție (deci cu durata pulsului laser, t_{eff}) și cu coeficienții de absorbție și

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser reflexie. Difuzia termică a energiei disipate în rețea duce la dependența PDCL direct proporțională cu radicalul duratei de puls în gama 10 ps – zeci de ns.

7.3. Măsurări PDCL

7.3.1. Măsurări PDCL acoperiri dielectrice

Pe durata stagiului de cercetare efectuat în Hanovra, la Laser Zentrum Hannover e.V.(LZH), în grupul de caracterizare a componentelor optice am efectuat o serie de măsurări ale pragului de distrugere pe componente cu acoperiri dielectrice. Acoperirile dielectrice au fost depuse la LZH.

Testele au fost efectuate pe o instalație de testare cu următoarele caracteristici:

Lungime de undă $\lambda = 786$ nm, energie per puls 0.6 mJ, frecvența de repetiție de 1 kHz, durata pulsului (FWHM) 180 fs.

Au fost studiate următoarele mixturi de acoperiri dielectrice:

- ▶ Ta₂O₅ / SiO₂
- ▶ HfO₂ / SiO₂
- ▶ Al₂O₃ / SiO₂

Am obținut următoarele rezultate experimentale:

a) Pentru mixtura Ta₂O₅ / SiO₂, am obținut pentru 0 % probabilitate de distrugere la 100 000 de pulsuri aplicate per sit, o valoare PDCL de 0% $LIDT_{100k-on-1} = 0.6$ J/cm², cu caracteristica de distrugere măsurată S-on-1 din Fig. 7.9.

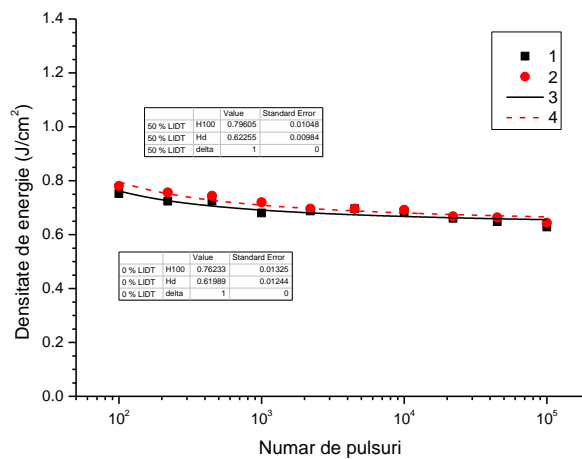


Fig.7.3. Caracteristica S-on-1 de distrugere măsurată a mixturii Ta₂O₅ / SiO₂

b) Pentru mixtura $\text{HfO}_2 / \text{SiO}_2$, am obținut pentru 0 % probabilitate de distrugere la 100 000 de pulsuri aplicate per sit, o valoare PDCL de 0% $\text{LIDT}_{100\text{k-on-1}} = 1 \text{ J/cm}^2$, cu caracteristica de distrugere măsurată S-on-1 din Fig. 7.10.

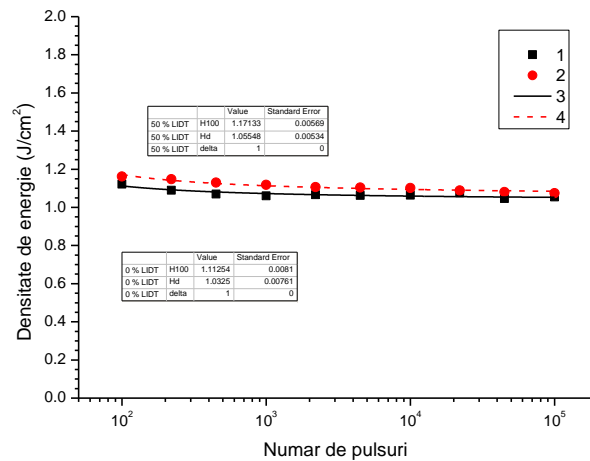


Fig.7.4. Caracteristica S-on-1 de distrugere măsurată a mixturii $\text{HfO}_2 / \text{SiO}_2$

c) Pentru mixtura $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$, am obținut pentru 0 % probabilitate de distrugere la 100 000 de pulsuri aplicate per sit, o valoare PDCL de 0% $\text{LIDT}_{100\text{k-on-1}} = 1.1 \text{ J/cm}^2$, cu caracteristica de distrugere măsurată S-on-1 din Fig. 7.11.

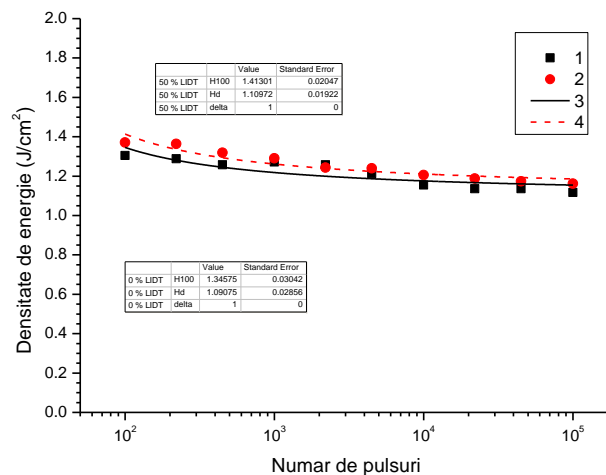


Fig.7.5. Caracteristica S-on-1 de distrugere măsurată a mixturii $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$

7.3.3. Măsurări PDCL prin testul S-on-1 efectuate pe stația automată în pulsuri de nanosecunde

În acest paragraf voi prezenta rezultatele testelor efectuate pe stația automată în pulsuri de nanosecunde pentru producători din industrie. Fiecare test efectuat cu succes reprezintă un certificat de calitate al unui întreg lot de componente optice (zeci sau chiar sute de componente optice) produse în aceleași condiții cu proba martor testată în laboratorul

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser ISOTEST. Raportul de test permite producătorului să certifice calitatea rezistenței în câmp laser a componentelor produse în același lot cu proba martor testată.

Rezultatele sunt grupate în funcție de semestrul de doctorat în care au fost efectuate.

În semestrul 3 am efectuat 16 teste S-on-1 pentru măsurarea PDCL la lungimea de undă de 1064 nm pe probe-martor de la 16 șarje de componente optice fabricate de Ophir Optics SRL. Componentele optice au fost acoperite cu acoperiri dielectrice antireflectante de banda largă sau total reflectante la lungimea de undă de 1540 nm din infraroșu apropiat. Probele-martor au fost depuse pe substrat din sticlă optică tip BK7 sau din sticla de cuarț. Au fost întocmite 15 Rapoarte de Test care au fost înaintate producătorului. Prin aceste teste, Ophir Optics SRL a verificat componentele fabricate din punct de vedere al rezistenței în câmp laser, înainte de a fi livrate beneficiarilor. Menționăm că această colaborare cu Ophir Optics este benefică în egală măsură această lucrare, care beneficiază în acest fel de componente optice la standarde laser pentru testarea procedurilor ISO implementate în cadrul laboratorului ISOTEST.

Măsurările au evidențiat o dispersie importantă a PDCL pentru probele de tip AR, în gama $2.4 \text{ J/cm}^2 - 18.6 \text{ J/cm}^2$. Considerăm că această dispersie a caracteristicilor de rezistență în câmp laser poate fi provocată în principal de doi factori:

1. Polisarea necorespunzătoare a suprafeței substratului probei-martor poate afecta semnificativ pragul de distrugere al acoperirii AR. Odată cu scăderea PDCL, se produce și o creștere a incertitudinii u_P în fitarea datelor experimentale, deoarece densitatea mare de defecte pe suprafața probei tinde să mascheze relația liniară dintre probabilitatea de distrugere și energia pulsurilor laser de test. Un exemplu elocvent în acest sens îl constituie probele SJ7567 și SJ7575 (poz. 1 și 4 din tabelul 7.3), care au cel mai scăzut PDCL dintre acoperirile AR (2.4 J/cm^2 , respectiv 5 J/cm^2), odată cu cele mai mari nivele ale incertitudinii u_P (37 %, respectiv 33 %).

2. Un anumit grad de nereproductibilitate a parametrilor procesului tehnologic existent pe unele din echipamentele utilizate de Ophir Optics în realizarea acoperirilor de tip AR.

Cu toată această dispersie a rezultatelor măsurării, statistica pe un număr relativ mare de probe a evidențiat caracteristicile intrinseci ale acoperirilor dielectrice antireflex în gama 600 nm – 1100 nm realizate de Ophir Optics: un prag de distrugere ridicat ($\text{PDCL} > 17 \text{ J/cm}^2$) și un nivel redus al incertitudinii totale a măsurării ($U_C = 19 \%$) atunci când calitatea optică a suprafeței substratului este corespunzătoare.

În semestrul 4 al perioadei de doctorat am efectuat 21 teste S-on-1 pentru măsurarea PDCL la lungimea de undă de 1064 nm pe probe-martor de la 21 șarje de componente optice fabricate de Ophir Optics SRL. Componentele optice au fost acoperite cu acoperiri dielectrice

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser antireflectante de bandă largă sau total reflectante reflectante în gama de lungimi de undă de 400 nm - 1100 nm. Probele-martor au fost depuse pe substrat din sticlă optică tip BK7 sau din sticla de cuarț. Au fost întocmite 21 Rapoarte de Test care au fost înaintate producătorului. Prin aceste teste, Ophir Optics SRL a verificat componentele fabricate din punct de vedere al rezistenței în câmp laser, înainte de a fi livrate beneficiarilor. Menționăm că această colaborare cu Ophir Optics este benefică în egală măsură această lucrare, care beneficiază în acest fel de componente optice la standarde laser pentru testarea procedurilor ISO implementate în cadrul laboratorului ISOTEST.

În semestrul 5 al perioadei de doctorat am efectuat 25 teste S-on-1 pentru măsurarea PDCL la lungimea de undă de 1064 nm pe probe-martor de la 24 șarje de componente optice fabricate de Ophir Optics SRL. Au fost întocmite 25 rapoarte de test care au fost înaintate producătorului.

În semestrul 6 al perioadei de doctorat am efectuat 19 teste S-on-1 pentru măsurarea PDCL la lungimea de undă de 1064 nm pe probe-martor de la 19 șarje de componente optice fabricate de Ophir Optics SRL. Au fost întocmite 19 rapoarte de test care au fost înaintate producătorului.

7.4. Testul de intercomparare cu laboratoarele Laser Zentrum Hannover e.V. și Vilnius University - LRC

Testele S-on-1 urmau să fie efectuate cu pulsuri laser de nanosecunde, la lungimea de undă de 1064nm. Ophir Optics a realizat trei seturi de probe de același tip, fiecare set fiind alcătuit din două substraturi de sticlă tip BK7 acoperite cu acoperiri anti-reflectante (AR) la lungimea de undă de 1064 nm și un substrat de sticlă tip BK7 nedepus.

Fiecare laborator participant (ISOTEST (ISOT), Laser Zentrum Hannover e.V (LZH) și Vilnius University – LRC (VU)) a efectuat testele S-on-1 în mod independent, ghidat numai de recomandările standardului ISO-21254. Valorile PDCL măsurate, împreună cu o estimare a incertitudinii rezultatelor măsurării, au fost comunicate celorlalți participanți.

7.4.4. Concluzii privind măsurările ISOT, LZH și VU

Rezultatele detaliate ale măsurărilor PDCL efectuate în laboratoarele ISOT, LZH și VU, listate în Tabelele 7.8. - 7.13, demonstrează că există o bună concordanță generală privind rezultatele măsurărilor PDCL din cele trei laboratoare. Convergența datelor PDCL este evidențiată de erorile relative medii discretizate ε din Tabelele 7.8.-7.13., care pot fi sintetizate după cum urmează:

- **ISOT – LZH**

- Pentru AR1 și AR2, eroarea relativă ε : $\varepsilon \in [2\% - 10\%]$ pentru 0% PDCL; $\varepsilon \in [8\% - 12\%]$ pentru 50% PDCL.
- Pentru substratul tip BK7, eroarea relativă ε : $\varepsilon \leq 26\%$ pentru 0% PDCL; $\varepsilon \leq 6\%$ pentru 50% PDCL.

- **ISOT – VU**

- Pentru AR1 și AR2, eroarea relativă ε : $\varepsilon \in [1\% - 10\%]$ pentru 0% PDCL.
- Pentru substratul tip BK7, eroarea relativă ε : $\varepsilon \leq 12\%$ pentru 0% PDCL.

Menționez că **VU** nu a furnizat date privind 50% PDCL.

Sinteza de mai sus arată că, **erorile relative discretizate ε privind datele ISOT – LZH și ISOT – VU prezintă în general un nivel relativ scăzut, în limitele [1% - 15%]**, cu o singură excepție ($\varepsilon \leq 30\%$ la 0% PDCL pentru ISOT – LZH).

Valoarea scăzută a erorilor relative ε atestă **congruența valorilor PDCL măsurate în laboratoarele ISOT, LZH și VU** pe probele furnizate de Ophir Optics. Menționăm că, luând în considerare experiența internațională în domeniul măsurării PDCL prin testul S-on-1 și experiența acumulată în acest domeniu de laboratorul ISOTEST, o incertitudine relativă până în limitele de $\pm 25\%$ în măsurarea PDCL atestă în general o procedură de măsurare corectă și o calitate optică rezonabilă a componentei testate.

Congruența rezultatelor PDCL obținute în cele trei laboratoare este ilustrată în Fig. 7.21, unde sunt comparate rezultatele obținute de ISOT, LZH și VU în măsurarea acoperirilor antireflectante de $\text{HfO}_2 / \text{SiO}_2$ (media valorilor 0% PDCL și 50% PDCL măsurate pe probele AR1 și AR2) în intervalul comun de valori ale numărului de pulsuri N , anume $N \in [10 - 500]$. Au fost considerate valorile exacte PDCL transmise de fiecare laborator, fără a fi approximate. Datele PDCL [J/cm^2] măsurate de ISOT și VU au fost scalate la durata pulsurilor laser din instalația LZH după cunoscuta dependență $\tau^{1/2}$, conform ecuației

$$PDCL_{scalat} = PDCL_{masurat} \cdot \left(\frac{\tau_{eff-LZH}}{\tau_{eff-X}} \right)^{1/2},$$

unde τ_{eff-X} este durata efectiva de puls $\tau_{eff-ISOT}$ sau τ_{eff-VU} .

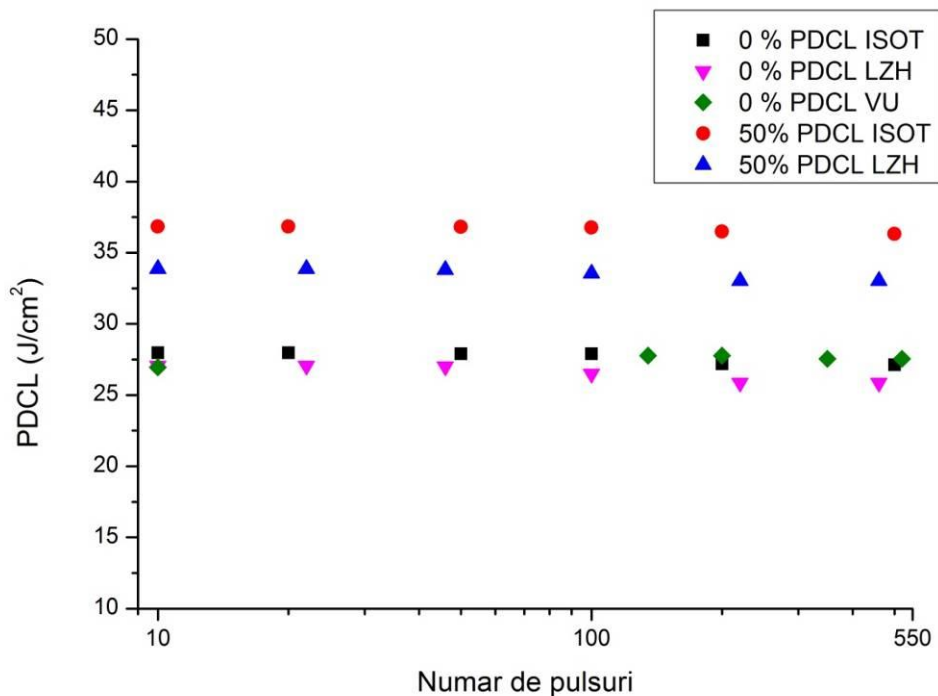


Fig.7.6. Valori 0% PDCL și 50% PDCL ale acoperirilor antireflex de $\text{HfO}_2 / \text{SiO}_2$ măsurate în laboratoarele ISOT, LZH și VU (valori mediate pe probele AR1 și AR2 pentru fiecare valoare a lui N) în intervalul comun de valori ale numărului de pulsuri N, $N \in [10 - 500]$.

Rezultatele de mai sus ale studiului de intercomparare reprezintă o importantă confirmare la nivel internațional a acurateții măsurărilor PDCL efectuate pe Stația Automată în pulsuri de nanosecunde din laboratorul ISOTEST. Menționăm că această stație automată a fost dezvoltată integral pe perioada studiilor de doctorat în cadrul proiectului ISOTEST, pe baza unor metode / soluții tehnologice originale elaborate și implementate în cadrul acestui proiect [27, 28].

7.5. Contribuții personale

În acest capitol am prezentat o scurtă introducere asupra mecanismelor de producere a defectelor induse optic pentru fiecare regim de lucru al laserilor de test, adică regimul de nanosecunde și regimul de femtosecunde. Am continuat cu evaluarea incertitudinii de măsurare a pragului de distrugere în câmp laser.

În continuare am prezentat studii de caracterizare a rezistenței materialelor și componentelor optice în câmp laser. Studiile sunt împărțite în două categorii în funcție de regimul de emisie al laserilor de test. Pe lângă aceste studii am prezentat un experiment de extrapolare a pragului

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser de distrugere definit în regimul de nanosecunde de către producătorul acestei componente optice, în regimul de femtosecunde, datele obținute se încadrează în limita erorilor de măsură. Cel mai important experiment din acest capitol este cel de intercomparare („round-robin”) cu laboratoarele LZH și VU. Experiment care a confirmat că stația de determinare a pragului de distrugere în câmp laser funcționează corect, iar valorile determinate pe această stație coincid cu valorile măsurate în laboratoarele LZH și VU, laboratoare cu zeci de ani de experiență în măsurări de acest gen.

Concluzii

C.2. Contribuții personale

1. Am proiectat și dezvoltat diverse părți componente ale celor două stații automate pentru determinarea PDCL în regim monopuls, conform ISO 21254-1, în regim multipuls conform ISO 21254-2, și testul de fiabilitate conform 21254-3. În prezent cu aceste stații se efectuează teste de determinare PDCL pentru producătorii de componente optice din industrie. Rezultatele implementării acestor stații au fost publicate la cea mai prestigioasă conferință din acest domeniu în [12] și [13]

2. Am modelat și aplicat o nouă metodă de calcul a parametrilor de propagare a fasciculelor laser, metoda ce a dus la reducerea erorilor de determinare a parametrilor cu mai mult de un ordin de mărime [C1].

3. Implementarea sistemului optic de zoom variabil în planul probei, sistem ce oferă posibilitatea reglajului diametrului efectiv al fasciculului fără a deplasa proba de-a lungul axei de propagare a fasciculului. Pe baza acestei implementări, a sistemului optic cu zoom variabil, a fost depusă o cerere de brevet de invenție la *Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci* cu numele și numărul: *Metoda de control a dimensiunii și a profilului spațial ale spotului laser în planul țintei*; A / 00326 din 26.04.2013 [P1].

4. Am optimizat implementarea algoritmului de operare al stațiilor automate de determinare a PDCL pentru a obține o eroare minimă cu un număr mic de puncte experimentale. Implementarea a fost realizată după indicațiile din standardul ISO 21254 și programul software de sine stătător care a rezultat din această implementare funcționează în conformitate cu acest standard. Implementarea acestui algoritm pentru funcționarea automată a fost necesară din cauza timpului foarte mare necesar pentru efectuarea unui astfel de test. Prin

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser implementarea secvenței automate a programului de operare timpul dedicat unui test obișnuit a scăzut de la câteva zile (2-3 zile în regim complet manual) la numai câteva ore (cu regimul automat).

5. Am stabilit protocolul de pornire și inițializare a echipamentelor și dispozitivelor componente ale stațiilor, necesar pentru o funcționare corectă a instalațiilor. Am dezvoltat protocolul de centrare a probelor în fascicul, protocol necesar pentru a putea testa probe de diferite forme și dimensiuni cu aceste instalații; centrarea probei este necesară pentru a obține suprapunerea hărții realizată în software-ul de operare cu suprafața optică a probei.

6. Implementarea unității de calcul pentru procese rapide (DSP) în stația automată pentru măsurarea PDCL; pe baza implementării a fost depusă o cerere de brevet de invenție la *Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci* cu numele și numărul: *Dispozitiv integrat în Stație Automată de măsurare ISO a pragului de distrugere a componentelor optice iradiate cu laser*; A / 00425 din 13.06.2012 [P2]

7. Am dezvoltat și implementat o tehnică și un dispozitiv rapid și simplu de utilizat pentru detecția defectelor induse de laser pe suprafețele optice testate. Tehnica este bazată pe monitorizarea radiației împrăștiată de probă la un unghi de incidență între $\approx 15^\circ \div 75^\circ$, radiația împrăștiată detectată provenind de la laserul de test după apariția unui defect pe suprafața probei. Rezultatele originale ale acestei implementări au fost publicate/prezentate în [L2], [C14].

8. Am dezvoltat și implementat o metodă de a măsura în timp real aria efectivă a unui fascicul într-un plan de interes definit (de exemplu planul probei), în conformitate cu definiția din standardul ISO a acestui parametru. Metoda folosește un analizor de fascicul pe bază de camera CCD și este aplicabilă în domeniul ultraviolet până în infraroșu apropiat. Efectul energiei de fundal și acuratețea metodei au fost evaluate prin simulări numerice în programul software Matlab. Rezultatele originale au fost prezentate în [C10] și [C12].

9. Am dezvoltat și implementat o metodă de măsurare și determinare a duratei efective a pulsurilor laser în gamă de durate de puls de nanosecunde și femtosecunde. Acest parametru este recomandat de standardul ISO 21254-1 să fie folosit pentru experimente de caracterizare a PDCL. Pentru comparație, am măsurat și durata la semi-înălțime a acelorași pulsuri. Rezultatele au fost publicate în [L1] și în [C9].

10. Am realizat un studiu al incertitudinii totale a măsurărilor efectuate pe stațiile automate pentru măsurarea PDCL. Datele din acest studiu fiind aplicate la elaborarea fiecărui raport de test întocmit pentru probele analizate.

11. Am realizat un studiu de corelare a energiei benzii interzise cu pragul de distrugere în câmp laser pentru mai multe tipuri de acoperiri optice. Măsurările au fost efectuate pe durata stagiului de cercetare în laboratoarele LZH, în regimul de femtosecunde.

12. Am realizat un studiu de extrapolare a pragului de distrugere în câmp laser definit în regimul de nanosecunde de un producător de componente optice, pentru o oglindă de argint protejat, extrapolare în regimul de femtosecunde. Testul a arătat o bună concordanță a extrapolărilor măsurărilor experimentale, conform altor studii din literatură, cu datele specificate de producător.

13. Am efectuat, pe stația automată pentru determinarea pragului de distrugere cu pulsuri de nanosecunde, un număr de peste 80 de teste pe un număr egal de probe martor. Raportul de test întocmit pentru fiecare din aceste probe martor reprezintă o certificare a lotului (lot de zeci sau chiar sute) de componente optice produse în același timp cu proba martor. Rezultatele acestor măsurări sunt grupate și analizate în funcție de semestrul de doctorat în care am efectuat aceste teste.

14. Am efectuat un studiu de intercomparare cu laboratoarele LZH și VU pe trei seturi de componente optice, rezultatele acestui studiu de intercomparare reprezintă o importantă confirmare la nivel internațional a acurateții măsurărilor PDCL efectuate pe Stația Automată în pulsuri de nanosecunde din laboratorul ISOTEST. Stația automată a fost dezvoltată integral pe perioada studiilor de doctorat în cadrul proiectului ISOTEST, pe baza unor metode / soluții tehnologice originale elaborate și implementate în cadrul acestui proiect.

Lista de lucrări

Patente depuse:

[P1] G. Nemeș, C. Blanaru, A. Stratan, A. Zorilă, L. Rusen

Metoda de control a dimensiunii și a profilului spațial ale spotului laser în planul țintei.

Patent request no. A / 00326 from 26.04.2013

[P2] S. Simion, C. Blanaru, A. Stratan, A. Zorilă

Dispozitiv integrat în Stație Automată de măsurare ISO a pragului de distrugere a componentelor optice iradiate cu laser

Patent request no. A / 00425 from 13.06.2012

Articole publicate în jurnale indexate ISI:

[L1] A. Zorilă, L. Rusen, A. Stratan, G. Nemeș, *Measuring the effective pulse duration of nanosecond and femtosecond laser pulses for laser-induced damage experiments*

Opt. Eng. 52 (5), 054203 (May 31, 2013);

[L2] A. ZORILĂ, S. SIMION, L. RUSEN, A. STRATAN, P. ȘCHIOPU, *Real-time*

detection of optical damage induced by high-power laser pulses, U.P.B. Sci. Bull., Series A 75, Iss. 4

[L3] M-R IOAN, I. GRUIA, G-V.IOAN, L. RUSEN, P. IOAN, A. ZORILĂ. Laser beam evaluation methods to study changes in 12 MeV energetic protons irradiated glasses Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 15, No. 11 – 12

Articole publicate în proceedings conferințe internaționale:

[L4] Stratan, A., Zorilă, A., Rusen, L., Simion, S., Blanaru, C., Fenic, C., ... & Nemeș, G. (2012, December). Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 21254-1, 2, 3, 4 standards. În *SPIE Laser Damage* (pp. 85301Y-85301Y). Internațional Society for Optics and Photonics

Comunicări orale și postere conferințe internaționale:

[C1] A. Zorilă, A. Stratan, G. Nemeș, *How to not use ISO 11146-1:2005 standard and get small relative errors in spatial beam characterization*

LID-LBC Workshop 2013, Bran, 22 May, România - oral presentation

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser

[C2] S. Simion, I. Dumitrache, **A. Zorilă**, L. Neagu, L. Rusen, A. Stratan

Controlling the number of pulses on target in laser damage experiments, using kilohertz repetition rate pulses

LID-LBC Workshop 2013, Bran, 22 May, România - oral presentation

[C3] L. Rusen, M-R. Ioan, P. Ioan, **A. Zorilă**, I. Gruia

Laser beam diagnosis techniques to measure changes in gamma irradiated glasses

LID-LBC Workshop 2013, Bran, 22 May, România - oral presentation

[C4] G. Nemeș, A. Stratan, **A. Zorilă**, I. Dumitrache, L. Rusen, L. Neagu

New method to diagnose spatial laser beam parameters

LID-LBC Workshop 2013, Bran, 22 May, România - oral presentation

[C5] G. Nemeș, A. Stratan, C. Fenic, **A. Zorilă**, L. Rusen, S. Simion, I. Dumitrache, C.

Blanaru, L. Neagu, *Automated stations for LIDT measurements according to ISO 21254-1,2,3,4 standards, using nano and femtosecond pulses*, LID-LBC Workshop 2013, Bran, 22 May, România - invited presentation

[C6] G. Nemeș, A. Stratan, **A. Zorilă**, *Characterizing laser beams in general and laser spots for LID experiments on targets - a comparison*,

LID-LBC Workshop 2013, Bran, 22 May, România - invited presentation

[C7] **A. Zorilă**, L. Rusen, S. Săndel, A. Stratan, C. Blanaru, C. Fenic, G. Nemeș, "Laser Induced Damage Threshold Test Station: Development and measurements - preliminary results", ISCP 2012, Sinaia, 8 - 12 May, România - oral presentation

[C8] L. Rusen, **A. Zorilă**, L. Neagu, A. Stratan, G. Nemeș, "ISO Procedure for Laser Beam Diagnosis", ISCP 2012, Sinaia, 8 - 12 May, România - poster presentation

[C9] A. Zorilă, L. Rusen, A. Stratan, G. Nemeș, "Measuring the effective duration of laser pulses", Advanced Topics în Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies - ATOM 2012 - 6th edition, Constanța, 23 - 26 August 2012, România - poster presentation

[C10] **A. Zorilă**, L. Rusen, A. Stratan, G. Nemeș, "Simple method to measure the clip-level (threshold) area of a laser spot", Micro - to Nano-Photonics III - ROMOPTO 2012, Bucharest, 3 - 6 September, România - poster presentation

[C11] G. Nemeș, A. Stratan, C. Fenic, **A. Zorilă**, L. Rusen, S. Simion, C. Blanaru, L. Neagu, "ISOTEST Project - current status and original results", Micro - to Nano-Photonics III - ROMOPTO 2012, Bucharest, 3 - 6 September, România - oral presentation

Contribuții la dezvoltarea unor stații automate de caracterizare a rezistenței mat. și comp. optice în câmp laser

[C12] G. Nemeș, A. Stratan, **A. Zorilă**, L. Rusen, "Effective area of pulsed laser spots within ISO 21254-1,2,3 standards: critical analysis, extensions, and measurements în near ultraviolet: near infrared domain", 2012 Laser Damage, Boulder-Colorado, 23 - 26 September, UȘA - poster presentation

[C13] A. Stratan, G. Nemeș, **A. Zorilă**, L. Rusen, S. Simion, C. Blănar, C. Fenic, L. Neagu, "Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 21254-1,2,3,4 standards", 2012 Laser Damage, Boulder-Colorado, 23 - 26 September, UȘA - poster presentation

[C14] **A. Zorilă**, S. Simion, L. Rusen, A. Stratan, "*Online damage detection using scattered radiation of damage-inducing laser beam*"
ISWLA - 2011, Bran, May 30 - June 4, 2011 - oral presentation

Bibliografie

- [1] *Theodore Maiman*, Stimulated optical radiation in ruby. *Nature* 187, p. 493-494 (1960)
- [2] *Paul Maker, Robert Terhune, and Carleton Savage*, Optical third harmonic generation. in Third International Symposium on Quantum Electronics. Grivet and N. Bloembergen, Editor p. 1559-1576 (1964)
- [3] ISO 11254-1: Lasers and laser-related equipment - Determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces - Part 1: 1-on-1 test, ISO, (2000)
- [4] *K.H. Guenther, T.W. Humpherys, J. Balmer, J.R. Bettis, E. Casparis, J. Ebert, M. Eichner, A.H. Guenther, E. Kiesel, R. Kuehnel, D. Milam, W. Ryseck, S.C. Seitel, A.F. Stewart, H. Weber, H.P. Weber, G.R. Wirtenson, R.M. Wood*, *Appl. Opt.* 23 (1984) 3743
- [5] *S.C. Seitel, A. Giesen, and J. Becker*, International Standard Test Method for Laser Induced Damage of Optical Surfaces. in *Laser Induced Damage in Optical Materials: 1992*. Harold E. Bennet, Lloyd L. Chase, Arthur H. Guenther, and M.J. Soileau, Editors, *Proc. of SPIE*, **1848**, p. (1993)
- [6] *Jurgen Becker and Achim Bernhardt*, *ISO 11254: an International Standard for the Determination of the Laser Induced Damage Threshold*. in *Boulder Damage Symposium 1993*. H. E. Bennett, L. L. Chase, A. H. Guenther, B. E. Newnam, and M. J. Soileau, Editors, *Proc. of SPIE*, **2114**, p. 703-713, (1994)
- [7] *Laurent Gallais and Jean-Yves Natoli*, "Optimized Metrology for Laser-Damage Measurement: Application to Multiparameter Study," *Appl. Opt.* **42**, 960-971 (2003)

- [8] ISO 21254-2:2011, Lasers and laser-related equipment -- Test methods for laser-induced damage threshold -- Part 2: Threshold determination
- [9] ISO 21254-3:2011, Lasers and laser-related equipment -- Test methods for laser-induced damage threshold -- Part 3: Assurance of laser power (energy) handling capabilities
- [10] M. A. Stevens-Kalceff, A. Stesmans, and Wong Joe, Defects induced in fused silica by high fluence ultraviolet laser pulses at 355 nm. *Applied Physics Letters* **80**(5), p. 758-760 (2002)
- [11] G. Nemes, "Optical systems and methods employing adjacent rotating cylindrical lenses", US Patent No. 7167321, (2007).
- [12] A. Stratan, A. Zorila, L. Rusen, S. Simion, C. Blanaru, C. Fenic, L. Neagu, G. Nemes, "Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 21254-1,2,3,4 standards", *Proc. SPIE* **8530**, 85301Y (2012).
- [13] G. Nemes, A. Stratan, A. Zorila, L. Rusen, "Effective area of pulsed laser spots within ISO 21254-1,2,3 standards: critical analysis, extensions, and measurements in near ultraviolet – near infrared domain", Paper 8530-72 presented at the SPIE Laser Damage Symposium XLIV: Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, 23-26 September 2012, Boulder, CO, USA.
- [14] Alexander A. Manenkov and Vladimir S. Nechitailo, "Physics of multishot laser damage to optical materials. in *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1990*" E. Bennett Harold, L. Chase Lloyd, H. Guenther Arthur, E. Newnam Brian, and M. J. Soileau, Editors, *Proc. of SPIE* **1441**, p. 392-405, (1991)
- [15] Alexandru ZORILA, Sandel SIMION, Laurentiu RUSEN, Aurel STRATAN, Paul SCHIOPU; "REAL-TIME DETECTION OF OPTICAL DAMAGE INDUCED BY HIGH-POWER LASER PULSES"; U.P.B. Sci. Bull., Series A, Vol. 75, Iss. 4, 2013
- [16] W. Plass, A. Giesen, *SPIE* 2714 (1995) 166
- [17] M. Mero, A. J. Sabbah, J. Zeller, and W. Rudolph, "Femtosecond dynamics of dielectric films in the pre-ablation regime." *Applied Physics A: Materials Science & Processing* **81**(2), p. 317-324 (2005)
- [18] S.S. Mao, F. Quere, S. Guizard, X. Mao, R.E. Russo, G. Petite, and P. Martin, "Dynamics of femtosecond laser interactions with dielectrics". *Applied Physics A: Materials Science & Processing* **79**, p. 1695–1709 (2004)
- [19] M. Jupe, L. Jensen, A. Melninkaitis, v. Sirutkaitis, and D. Ristau, "Calculations and experimental demonstration of multi-photon absorption governing fs laser-induced damage in titania," *Optics Express*, vol. 17, no. 15, pp. 12269-12278, 2009.
- [20] J. Jasapara, A. V. V. Nampoothiri, and W. Rudolph, "Femtosecond laser pulse induced breakdown in dielectric thin films," *Phys. Rev. B*, vol. 63, pp. 045117, 1-5, 2001.
- [21] M. Lenzner, J. Krüger, S. Sartania, C. Spielmann, G. Mourou, W. Kautek, and F. Krausz, "Femtosecond optical breakdown in dielectrics," *Phys. Rev. Letters*, vol. 80, no. 18, pp. 4076{4079, 1998.
- [22] M. Bass and H. Barrett, "Avalanche breakdown and the probabilistic nature of laser induced damage". *Quantum Electronics, IEEE Journal of* **8**(3), p. 338-343 (1972)
- [23] L. V. Keldysh, "Ionization in the field of a strong electromagnetic wave (multiphoton absorption processes and ionization probability for atoms and solids in strong electromagnetic field) ", *Soviet Physics-JTEP*, vol. 20, pp. 1307-1314, 1965.
- [24] B. Rethfeld, "Unified model for the free-electron avalanche in laser-irradiated dielectrics", *Phys. Rev. Letters*, vol. 92, no. 18, pp. 187401, 1{4, 2004.
- [25] Hue, J., Dijon, J., Garrec, P., Ravel, G., Poupinet, L., & Lyan, P. (1999, April). "Beam characterization: application to the laser damage threshold". In *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1998* (pp. 633-644). International Society for Optics and Photonics.
- [26] R. M. Wood, "Laser-induced damage of optical materials." *Optics & Optoelectronics* 2003, Bristol and Philadelphia Institute of Physics Publishing
- [27] S. Simion, C. Blanaru, A. Stratan, A. Zorila "Dispozitiv integrat in statie automata de masurare ISO a pragului de distrugere a componentelor optice iradiate cu laser", *Cerere de Brevet de Inventie OSIM nr. A /00425 / 13.06.2012.*
- [28] G. Nemes, C. Blanaru, A. Stratan, A. Zorila, L. Rusen, "Metoda de control a dimensiunii și a profilului spațial ale spotului laser în planul tinteii", *Cerere de brevet de inventie OSIM nr. A / 00326 din 26.04.2013.*