

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie **POLITEHNICA** București

Școala doctorala Științe Aplicate

Teză de doctorat - Rezumat

Tehnica microscopiei de forțe atomice și
tehnicile de detecție a temperaturii și stresului în
lungul unei fibre optice de telecomunicații – O
abordare inovativă

Conducător științific

Prof. Dr.rer.nat. Marian Enăchescu

Doctorand

Jderu Alexandru-Alin

Cuprins

Capitolul 1.....	1
1. 1. Introducere.....	1
1. 1. 1. Introducere în microscopia de forțe atomice.....	2
1. 1. 2. Introducere în detecția prin fibră optică	3
1. 2. Referințe	4
Capitolul 2.....	5
2. 1. Introducere.....	5
2. 2. Descrierea tehnicii AFM	5
2. 3. Indicatorii de performanță ai sistemelor AFM	7
2. 4. Studiul produselor de tip AFM existente în piață.....	9
2. 5. Studiul componentelor utilizate ca punct de plecare pentru construirea echipamentului AFM	10
2. 6. Concluzii.....	10
2. 7. Referințe	13
Capitolul 3.....	14
3. 1. Introducere in detecția prin fibră optică	14
3. 2. Analiza stadiului actual al tehnicilor: a) BOTDA și b) OFDR.....	16
3.2.1 Analiza optică Brillouin în domeniul de timp (BOTDA)	16
3.2.2. Reflectometru Optic în Domeniul de Frecvență (OFDR)	19
3. 3. Concluzii.....	20
3. 4. Referințe	21
Capitolul 4:.....	23
4. 1. Introducere.....	23

Tehnica microscopiei de forțe atomice și tehnicile de detecție a temperaturii și stresului în lungul unei fibre optice de telecomunicații – O abordare inovativă

4. 2.	Proiectarea și dezvoltarea ansamblor necesare pentru construirea sistemului AFM24	
4.2.1.	Componentele optice și mecanice	24
4.2.2.	Electronica (unitatea de control) a sistemului AFM	25
4. 3.	Concluzii.....	26
4. 4.	Referințe	29
Capitolul 5.....		30
5. 1.	Introducere.....	30
5. 2.	Implementarea sistemului de detecție BOTDA.....	32
5.2.1.	BOTDA: Partea de electronică.....	32
5.2.2.	BOTDA: electronica, optica și mecanica.....	32
5.2.3.	Interfața software pentru BOTDA.....	34
5.2.3.1.	Platforma software – achiziție de date	34
5.2.3.2.	Platforma software – procesare date	34
5.2.4.	Rezultate obținute cu platforma BOTDA.....	35
5. 3.	Concluzii.....	37
5. 4.	Referințe	37
Capitolul 6.....		39
6. 1.	Introducere.....	39
6. 2.	Implementare OFDR (detecție pe distanță mică)	40
6.2.1.	OFDR: Partea de optică și mecanică [6]	41
6.2.2.	OFDR: Electronica.....	41
6.2.3.	Platforma Software OFDR	42
6. 3.	Mass flow Monitoring – experiment [7], [8], [9]	43
6.3.3.	Implementare Software	47
6. 4.	Concluzii.....	47

Tehnica microscopiei de forțe atomice și tehnicile de detecție a temperaturii și stresului în lungul unei fibre optice de telecomunicații – O abordare inovativă

6.4.1. Concluzii – mass flow monitoring	47
6.4.2. Concluzii - platforma OFDR.....	50
6. 5. Referințe	53
Capitolul 7.....	55
7. 1. Microscopul de forțe atomice	55
7. 2. BOTDA	56
7. 3. OFDR.....	57
7. 4. Mass Flow Monitoring	59
7. 5. Perspective de viitor	61
Activități Științifice	62

Capitolul 1

1. 1. Introducere

Scopul acestei teze de doctorat este de a realiza și implementa trei tehnici avansate de măsură și trei dispozitive/echipamente fizice asociate acestor tehnici, cu aplicabilitate în două domenii științifice diferite. Prima tehnică și primul dispozitiv/echipament descris este dedicat microscopiei de forțe atomice, echipament ce va fi utilizat în scanarea profilului suprafeței probelor de interes, scanare cu rezoluție capabilă de vizualizare a atomilor pe suprafața de studiat. Celelalte două tehnici și echipamente asociate, descrise în această teză sunt pentru a detecta temperatura și stresul de-a lungul unei fibre optice de telecomunicații pe distanțe, mici (de câțiva metri) și mari (de peste 50km).

Obiectivele acestei tezei doctorale sunt următoarele:

- i. analiza stadiului actual de dezvoltare a acestor tehnici și echipamente din punct de vedere al performanțelor;
- ii. dezvoltarea, implementarea și testarea celor trei dispozitive cu specificații minime similare sau îmbunătățite comparativ cu dispozitivele avansate deja existente pe piață.

Teza de doctorat este organizată în două părți principale și este alcătuită din șase capitole:

Prima parte a tezei doctorale este constituită din Capitolele II și III, reprezentând partea de literatură de specialitate și de studii de piață legate de cele 3 tehnici:

- Capitolul II: introduce tehnica AFM (Atomic Force Microscope) și indicatorii de performanță ai sistemelor AFM și este urmată de o analiză a produselor AFM existente pe piață.

- Capitolul III: prezintă o introducere în tehnica de detecție prin fibră optică, urmată de o analiză a stadiului actual al tehnicilor și echipamentelor BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) și OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry).

Cea de-a doua parte a tezei doctorale este formată din Capitolele IV, V și VI și reprezintă partea originală a acestei teze:

- Capitolul IV: se concentrează pe proiectarea și dezvoltarea ansamblelor necesare pentru construirea sistemului aferent tehnicii AFM. Acest capitol se încheie cu rezultatele obținute cu acest nou sistem, capabil de rezoluție atomică în aer.
- Capitolul V: se descriu procedurile experimentale utilizate pentru implementarea sistemului de detecție aferent tehnicii BOTDA. În urma experimentelor realizate, dispozitivul demonstrează o rezoluție de temperatură de 0.2 °C și o rezoluție de deformare de 4 μs. În același timp rezultatele obținute arată o rezoluție spațială de 1 m susținută pe o distanță de aproximativ 100 km.
- Capitolul VI: prezintă implementarea dispozitivului aferent tehnicii OFDR. Utilizând acest echipament a fost dezvoltată și o nouă metodă de măsurare a debitului de fluid printr-un tub („Mass flow monitoring”). Rezultatele arată o rezoluție de 1K cu o rezoluție spațială de 5 cm susținută pe o distanță de câțiva zeci de metri.

1. 1. 1. Introducere în microscopia de forțe atomice

Nanotehnologia (inclusiv nanoștiința) reprezintă abilitatea de a vedea și manipula materia la scară nanometrică cu scopul de a produce noi structuri, materiale și dispozitive cu aplicații în multiple sectoare (de ex. medicină, automobile, aeronautică, energie etc.), făcând posibile progresele tehnologice remarcabile din zilele noastre. Era nanotehnologiei a început odată ce oamenii de știință au avut instrumentele de analiză potrivite, cum ar fi microscopul cu forță atomică (Atomic Force Microscope) [1].

Microscopia de forță atomică (AFM) este una dintre cele mai utilizate tehnici în domeniul nanostiintei (în multe cazuri fiind chiar indispensabilă), permițând imagistică la rezoluție înaltă (chiar și atomică) a oricărui tip de suprafață, inclusiv polimeri, ceramici, dispozitive electronice,

compozite, sticlă și probe biologice. Tehnica AFM este capabilă să evalueze și să cuantifice multiple tipuri de proprietăți ale materialelor precum cele electrice, magnetice, mecanice etc. simultan și în corelație directă cu morfologiile suprafețelor analizate (analize co-localizate) [2, 3, 4].

Importanța indiscutabilă a tehnicii AFM, dar și versatilitatea acesteia, m-au determinat să consider proiectarea și dezvoltarea (construirea) unui astfel de sistem capabil să investigheze atât suprafețe extrem de reduse – până la rezoluție atomică, cât și suprafețe extinse utilizând același sistem de scanare (tub piezoelectric). Însă, pentru realizarea acestui lucru a fost imperios necesară cercetarea tehnicilor și a soluțiilor hardware și software, existente deja în piață pentru construirea unui astfel de sistem AFM.

1. 1. 2. Introducere în detecția prin fibră optică

Rolul fibrelor optice în detecție poate fi clasificat în funcție de modul în care este utilizată fibra. Dacă aceasta este utilizată ca purtător al cantității măsurate fizic, se numește fibră extrinsecă, iar dacă traduce o cantitate în semnal optic măsurabil, atunci se numește fibră intrinsecă.

Senzorii de fibre extrinseci utilizează un cablu de fibră optică, în mod normal unul multimodal. Acesta este utilizat pentru a transmite o lumină modulată, fie de la un sensor optic fără fibre, fie de la un sensor electronic conectat la un transmițător optic [5]. Senzorii extrinseci pot fi utilizați în același mod, de exemplu pentru a măsura temperatura internă a transformatoarelor electrice, unde câmpurile electromagnetice extreme fac alte tehnici de măsurare imposibile [5]. Tehnicile de detecție ce folosesc senzorii de fibră optică extrinseci oferă o protecție excelentă a semnalelor măsurate împotriva zgomotului.

În aceste tehnici de detecție pe domeniul de timp este trimis un impuls prin fibră, iar lumina reflectată de fibră în fiecare punct este analizată în domeniul de timp (măsurare time-of-flight). Timpii diferiți corespund diferitelor locații de-a lungul fibrei, iar lățimea impulsului luminii determină rezoluția spațială finală a tehnicii. Există mai multe tehnici în domeniul de timp, care variază în funcție de tipul de împrăștiere care intră în procesul de detecție.

Dispozitivele ce folosesc aceste tehnici de detecție cu fibre optice au un impact major asupra implementărilor recente. Tehnica BOTDA permite atingerea unor măsurători de stres de ordinul $\mu\epsilon$ și de temperatură de ordinul $^{\circ}\text{C}$ pe distanțe mai mari de 100km menținând o rezoluție de 1 m. În timp ce tehnica OFDR permite atingerea unor măsurători de stres sub ordinul $\mu\epsilon$ și de temperatură sub ordinul $^{\circ}\text{C}$ pe distanțe de câțiva zeci de metri dar cu o rezoluție sub micrometrică.

După cum se poate vedea, importanța indiscutabilă a tehnicilor de detecție prin fibră optică, dar și versatilitatea acestora, m-au determinat să consider proiectarea și dezvoltarea unui astfel de sistem capabil de detecție atât pe distanțe mari, cât și pe distanțe mici. Însă, pentru realizarea acestui dispozitiv a fost imperios necesară cercetarea stadiului actual al dezvoltărilor acestor tehnici (BOTDA și OFDR) dar și a dispozitivelor existente deja pe piață.

1. 2. Referințe

- [1] M. Berger, Nanotechnology: The Future is Tiny, Royal Society of Chemistry, ISBN-10: 1782625267, 2016.
- [2] P. W. Peter Eaton, Atomic Force Microscopy, New York: Oxford University Press Inc., ISBN 978-0-19-957045-4 (Hbk.), 2010.
- [3] E. Meyer, „Atomic force microscopy,” *Progress in Surface Science*, vol. 41, nr. 1, pp. 3-49, 1992.
- [4] S. Morita, Roadmap of Scanning Probe Microscopy, Springer, ISSN: 1434-4904, 2007.
- [5] Y.-J. Rao, Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry–Perot interferometric sensors, vol. 12, *Optical Fiber Technology*, 2006, pp. 227-237.

Capitolul 2

Tehnica AFM și indicatorii de performanță a sistemelor AFM. **Cercetarea soluțiilor hardware și software existente pe piață pentru** **construirea unui sistem AFM.**

2. 1. Introducere

Tehnica utilizată de microscopul de forță atomică (AFM) generează un tip de microscop cu o rezoluție foarte înaltă, de ordinul fracțiunilor de nanometru (nm), rezoluție ce este de peste 1000 de ori mai bună decât a microscopelor optice [1, 2].

În ultimi ani, datorită dezvoltărilor tehnologice ce vizează aplicații bazate pe proprietăți la scară nanometrică din domenii precum biologia, medicina, știința și ingineria materialelor, electronica și optoelectronică, a crescut considerabil necesitatea de dezvoltare a echipamentelor ce folosesc această tehnică și sunt capabile să ofere informații la acest nivel.

În baza acestui studiu, au fost definite și identificate cu succes modelele software și hardware ce permit măsurarea și analizarea semnalelor generate de tehnica AFM. De asemenea, au fost identificate și o serie de componente și elemente în care pot fi inserate note de originalitate ce pot fi implementate la construcția sistemului, precum cap de măsură cu un design original inovativ, noi module electronice de comandă și măsurare, platforma software cu interfața „user-friendly”, adaptabilă, pentru achiziția de date și post-procesarea acestora.

2. 2. Descrierea tehnicii AFM

Schema de principiu a acestui dispozitiv utilizat în tehnica de măsurare a forțelor atomice este prezentată în Fig. 2. 1 și are ca element principal un cantilever, folosit la scanarea suprafeței probei. Acest este cel care interacționează cu suprafețele investigate în timpul scanărilor. Practic, în momentul în care vârful este adus în proximitatea suprafeței probei, forțele de interacție dintre acestea (vârf-probă) generează îndoirea/deflexia cantilever-ului. Gradul de îndoire poate fi măsurat utilizând diverse metode, cel mai des întâlnită fiind cea bazată pe o configurație laser-fotodetector. În această metodă un fascicul laser este aliniat pe

partea puternic reflectivă (spatele) a cantilever-ului, acesta fiind ulterior reflectat într-o celulă cu 4 fotodiode (fotodetector), poziția pe cele 4 fotodiode permițând cuantificarea deflexiei cantilever-ului. În sistemul AFM o altă componentă importantă este tubul piezoelectric, tub care este echipat cu un suport pe care se montează proba pe care dorim să o investigăm, astfel făcând posibilă deplasarea probei pe direcțiile X, Y și Z, în funcție, bineînțeles, de relieful acesteia [2, 3, 4].

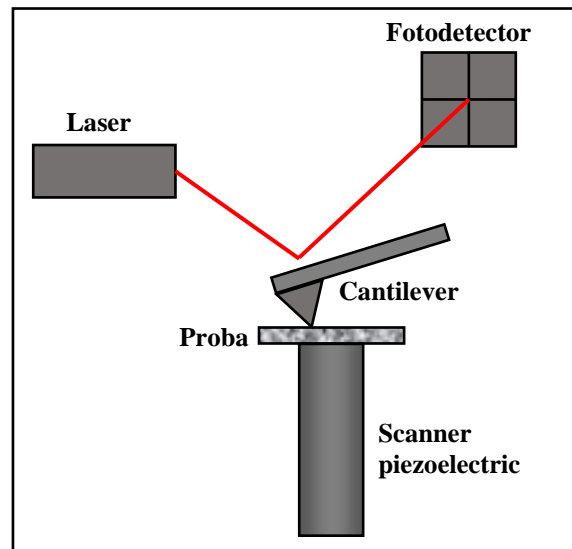


Fig. 2. 1 Reprezentare schematică a principiului de funcționare al unui AFM

Un astfel de microscop are mai multe moduri de operare, printre care [5, 6, 7]:

- **Modul Contact (Contact mode):** vârful (cantilever-ului) este adus în contact cu proba și baleiat pe suprafața de interes a acesteia (x, y) menținând constantă deflexia/îndoirea cantilever-ului prin bucla de feedback.
- **Modul non-contact (Non-contact mode):** vârful este oscilat la frecvența de rezonanță a cantilever-ului, cu o amplitudine ajustabilă, fiind în general de câțiva nanometri. Amplitudinea de oscilație este semnalul de feedback în acest mod. Astfel, în timpul unei scanări, variațiile verticale de pe suprafață vor genera modificarea amplitudinii de oscilație, modificările fiind preluate de controller care va încerca menținerea constantă a acesteia ajustând poziția probei pe Z prin cu ajutorul tubului piezoelectric.
- **Modul contact intermitent (Tapping mode):** în condiții ambientale normale, majoritatea probelor formează un strat de lichid pe suprafață. Din această cauză este foarte dificilă menținerea vârfului în mod non-contact, astfel încât forțele să fie

detectabile și fără ca vârful să intre în contact cu proba. În acest mod cantilever-ul este oscilat la o frecvență sub cea de rezonanță, cu o amplitudine ajustabilă, în general, fiind de 100-200 nm. Tubul piezoelectric este folosit pentru a deplasa proba pe Z, cu scopul de a menține o amplitudine constantă a vârfului. Practic în acest mod, cantilever-ul intră în contact cu suprafața probei pentru perioade foarte scurte de timp.

Obiectivul final al acestui studiu privind tehnica AFM și dispozitivele existente pe piață are ca scop proiectarea și dezvoltarea unui microscop de forțe atomice capabil să lucreze atât în mod contact la rezoluție atomică, cât și în mod non-contact cu o rezoluție verticală de 0.01 nm, capabil de imagistică pe arii reduse, dar și arii extinse (de până la aproximativ $50 \times 50 \mu\text{m}^2$), în multiple medii (condiții ambientale, în mediu cu umiditate controlată, în mediu de gaze inerte sau în vid până la 10^{-4} torr).

2. 3. Indicatorii de performanță ai sistemelor AFM

Pentru efectuarea eficientă a studiului mai sus precizat, în primă fază au fost identificați parametri ce indică nivelul de performanță al sistemelor AFM.

Un prim parametru este **sampling rate-ul** (rata de eșantionare). Sampling rate-ul, în sens larg, numit și sampling frequency (frecvența de eșantionare) definește numărul de măsurători al unui semnal în unitatea de timp [s]. Unitatea de măsură este Hz, dar uneori este notată ca S/s (samples/s).

$$f_s = N \left[\frac{kS}{s} \right] = N \text{ [kHz]},$$

unde f_s este frecvența de eșantionare, iar N este numărul de măsurători.

În cazul unui sistem AFM, sampling rate-ul reprezintă numărul de puncte citite în unitatea de timp, după cum urmează:

$$f_{s,p} = N \left[\frac{S}{s} \right] = N \text{ [Hz]} = N \left[\frac{\text{puncte}}{s} \right]$$

Această rată de eșantionare în cazul unui sistem AFM, poate fi reprezentată în mai multe moduri, utilizând diferite mărimi cheie. Să presupunem că este scanată o imagine de 512×512 pixeli cu ajutorul unui AFM. Acest lucru înseamnă că sistemul furnizează la final o imagine formată din 512 linii, fiecare dintre aceste linii având la rândul său 512 puncte. Aceasta

este o primă situație în care se poate calcula sampling rate-ul unui AFM. Așadar, pentru a afla sampling rate-ul liniilor poate fi utilizată următoarea formulă:

$$f_{s.l} = \frac{N}{512} \left[\text{linii}/s \right] = \frac{f_{s.p}}{512} \left[\text{linii}/s \right],$$

cu ajutorul căreia poate fi identificat timpul de scanare al unei linii de 512 puncte, acesta fiind în exemplul dat de $512/N$ (s).

De asemenea, poate fi calculat sampling rate-ul întregii imagini, acesta fiind un alt mod de a utiliza acest parametru în AFM. Considerând în continuare același exemplu, imaginea de 512×512 pixeli, sampling rate-ul poate fi calculat după cum urmează:

$$f_{s.i} = \frac{N}{512 * 512} \left[\text{imagini}/s \right]$$

Mai concret, această formulă calculează timpul de scanare al unei imagini de 512×512 pixeli, care este egal cu $512 * 512 / N$ (s).

Rezoluția este unul dintre cei mai importanți parametri ce descriu performanța unui sistem în general, aplicând-se și în cazul sistemelor AFM. Când discutăm despre sisteme de achiziție de date, în general, pot fi considerate două tipuri de rezoluții. Primul tip este numit **“Peak-to-peak resolution”** sau **“noise free resolution”** și se poate determina utilizând valorile zgomotului date în fișa tehnică (datasheet). Pentru a determina această rezoluție, trebuie, în primă fază, calculat **“signal-to-noise ratio” (SNR)**:

$$SNR = 20 \log \left(\text{noise} / \text{full - scale input} \right)$$

Apoi, **“Peak-to-peak resolution”** se poate afla calculând **SNR** folosind **“peak noise”** care este egal cu $6.6 * \text{“rms noise”}$.

$$SNR = 6.02 * N + 1.76 = 20 \log \left(\text{noise} / \text{full - scale input} \right),$$

unde N este precizia.

De exemplu, conform specificațiilor, **“rms noise-ul”** cipului AD7719 este $1.25 \mu\text{V}$ când semnalul de intrare analogic este între $\pm 2.56\text{V}$ și frecvență 5.35 Hz . Astfel vom avea:

$$20 \log \left(6.6 * 1.25E - 6 / 2.56 * 2 \right) = -115.85 \text{ dB},$$

iar de aici putând fi calculată rezoluția **“peak-to-peak”** după cum urmează:

$$115.85 = 6.02 * N + 1.76 \Rightarrow N = \frac{115.85 - 1.76}{6.02} = 19 \text{ Biti}$$

Cu alte cuvinte, rezoluția peak-to-peak ne arată, considerând condițiile din exemplul de mai sus, că nu va exista nici o fluctuație a semnalului pe 19 biți.

Un alt parametru extrem de important este **effective resolution (rezoluția efectivă)**. Acesta se calculează în baza parametrului “*rms noise*”, după cum urmează:

$$20 \log\left(1.25E^{-6}/2.56 * 2\right) = -132.25 \text{ dB},$$

obținând astfel o rezoluție efectivă de:

$$132.25 = 6.02 * N + 1.76 \Rightarrow N = \frac{132.25 - 1.76}{6.02} = 21.7 \text{ Biti}$$

Într-un mod simplist, rezoluția efectivă arată, în exemplul considerat aici, că 21.7 biți vor avea fluctuații. Practic rezoluția “*peak-to-peak*” este un indicator mai bun sau util al performanțelor unui sistem, deoarece indică limita numărului de biți la care se poate lucra fără fluctuații.

Trebuie menționat că producătorii de sisteme AFM pot utiliza metode diferite pentru a calcula aceste rezoluții. Metoda prezentată mai sus este utilizată de www.analog.com și este prezentată cu titlu informativ pentru a arata diferența între cele două tipuri de rezoluții.

2. 4. Studiul produselor de tip AFM existente în piață

În acest subcapitol sunt prezentate rezultatele studiului efectuat pentru identificarea și analizarea performanțelor atât din punct de vedere hardware, cât și software ale produselor fabricate de companiile ce furnizează echipamente pentru măsurarea forțelor atomice.

Astfel, au fost identificate companiile ce produc echipamente de acest tip AFM/SPM și sunt după cum urmează: Bruker; Agilent Technologies – California; Asylum Research – California; JPK Instruments – Germania; NanoScience Instruments – US; Nanosurf; WITec; Park Systems – Korea; Advanced Integrated Scanning Tools for Nano Technology (AIST-NT); NT-MDT – Rusia; AFM Workshop – California; RHK Technology; Nanonics – Israel; Veeco – California; ElbaTech – Italia.

Toate produsele acestor companii au fost analizate atât din punct de vedere al performanțelor software, cât și al celor hardware (la nivel hardware studiul a fost axat în special pe partea de electronică), iar concluziile rezultate sunt prezentate în detaliu în secțiunile următoare.

2. 5. Studiul componentelor utilizate ca punct de plecare pentru construirea echipamentului AFM

Ca punct de plecare pentru construirea noului microscop de forțe atomice este folosit microscopul AFM „Home built” ce a fost construit integral în laborator. În baza datelor tehnice ale acestui echipament, au putut fi extrase specificațiile de performanță corespunzătoare.

Tot în acest capitol este prezentată placa de achiziții selecționată ca și punct de plecare pentru noul microscop AFM (NI PXI-7851) împreună cu specificațiile și performanțele aferente.

2. 6. Concluzii

Toate informațiile rezultate din studiul efectuat sunt rezumate în tabelul următor, Tabelul 1.1. Astfel, a fost generată o imagine de ansamblu privind indicatorii de performanță ce definesc timpul de achiziție al imaginilor pentru sistemele analizate. Informațiile din tabel sunt organizate în funcție de producătorii de echipamente.

Tabel 1.1 Performanța privind timpul de achiziție al sistemelor AFM existente în piață

Producător	Model echipament	ADC	DAC	Timp achiziție linie [512pct]	Timp achiziție imagine [512x512pct]	OBS (informații precizate de producător)
BRUKER	Dimension FastScan	-	-	0.016s	8.197s	Imagine 16Mp în 8minute
	Innova IRIS	100kHz (20bit)	100kHz (20bit)	0.005s	2.65s	Calculat
Agilent	5420	-	-	10.64s	1.52h	Timp achiziție
Asylum Research	Cyper S	80MHz (16bit)	40MHz (16bit)	0.0000128 s	0.0065s	Calculat
	MFP 3D	5MHz (16bit)	100kHz (24bit)	0.00512s	2.62s	Calculat

JPK Instrumens	NanoOptic	60MHz (16bit)	-	0.0000085	0.0044s	Calculat
	NanoScience / BioScience	60MHz (16bit)	-	0.0000085	0.0044s	Calculat
NanoScience/ NanoSurf	Nanite	-	-	0.1024s	52.53s	Calculat
WITec	Alpha 300/500	-	-	0.256s	131.58s	Viteză maximă de achiziție.
Parker	Ramura de cercetare	500kHz (16bit)	500kHz (16bit)	0.001024s	0.524s	Calculat
	Ramura industrială	500kHz (16bit)	500kHz (16bit)	0.001024s	0.524s	Calculat
AIST-NT	SmartSPM 1000	500kHz (18bit)	-	0.001024s	0.524s	Calculat
	CombiScope 1000	500kHz (18bit)	-	0.001024s	0.524s	Calculat
	OmegaScope 1000	500kHz (18bit)	-	0.001024s	0.524s	Calculat
AFM Workshop	Toate	48kHz (14bit)	7kHz (24bit)	0.0731s	37.45s	Calculat
RHK	R9	100MHz (16bit)	100MHz z (16bit)	0.00156s	0.8s	Viteză de scanare 128x128px
	SPM 100	-	-	2s	1020s	Rezultate experimentale
Paul Hansma Research	-	-	-	0.001s	0.5s	8 imagini de 256x256px / s
Softdb	MK2-A810	-	-	0.0034s	1.748s	Calculat
STM	Proiect	85kSPS	50kHz	0.0102s	5.23s	Calculat

Nanonics	Toate	4MHz (18bit)	-	0.000128s	0.06s	Calculat
„Home- built” AFM	-	100kHz (16bit)	200kHz (16bit)	0.05s	26.32s	Calculat
PXI 7851R	-	750kHz (16bit)	1MHz (16bit)	0.000683s	0.35s	Calculat
<p>Calculat se referă la faptul că, producătorul nu precizează în cât timp se realizează o achiziție. Timpul a fost calculat conform fisei tehnice, utilizând specificațiile celei mai lente componente din configurația sistemului. În realitate (experimente), acesta poate fi mai lent.</p>						

Obiectivul final al acestui studiu are ca scop proiectarea și dezvoltarea unui microscop cu forțe atomice cu multiple elemente de originalitate (cap de măsură cu un nou design, noi module electronice, platforma software nouă etc.) capabil să lucreze atât în mod contact la rezoluție atomică, cât și în mod non-contact cu o rezoluție verticală de 0.01 nm, capabil de imagistică pe arii reduse, dar și arii extinse (de până la aproximativ 50x50 μm²), în multiple medii (condiții ambientale, în mediu cu umiditate controlată, în mediu de gaze inerte sau în vid până la 10⁻⁴ torr).

2. 7. Referințe

- [1] P. W. Peter Eaton, Atomic Force Microscopy, New York: Oxford University Press Inc., ISBN 978-0-19-957045-4 (Hbk.), 2010.
- [2] K. S. Birdi, Scanning Probe Microscopes, Applications in Science and Technology, eBook ISBN: 9780429214820, CRC Press, 2003.
- [3] "Marius Enachescu, D. Schleef, D. Frank Ogletree, Miquel Salmeron," *Physical Review B*, vol. 60, no. 24, 1999.
- [4] M. Enachescu, "Nanoscale Effects of Friction, Adhesion and Electrical Conduction in AFM Experiments," in *Atomic Force Microscopy - Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*, InTech, 2012.
- [5] M. Berger, Nanotechnology: The Future is Tiny, Royal Society of Chemistry, ISBN-10: 1782625267, 2016.
- [6] E. Meyer, "Atomic force microscopy," *Progress in Surface Science*, vol. 41, no. 1, pp. 3-49, 1992.
- [7] S. Morita, Roadmap of Scanning Probe Microscopy, Springer, ISSN: 1434-4904, 2007.

Capitolul 3

Tehnicile de detecție cu fibre optice și indicatorii de performanță. **Cercetarea soluțiilor hardware și software existente pe piață pentru** **sistemele de detecție cu ajutorul fibrelor de telecomunicații pe post de** **senzori.**

3. 1. Introducere in detecția prin fibră optică

Rolul fibrelor optice in tehnica de detecție distribuită poate fi clasificat in funcție de modul in care este utilizată fibra. Dacă aceasta este utilizată ca purtător al cantității măsurate fizic, se numește fibră extrinsecă, iar dacă traduce o cantitate în semnal optic măsurabil, atunci se numește fibră intrinsecă.

Tehnica ce folosește senzorii de fibre extrinseci utilizează un cablu de fibră optică, în mod normal unul multimodal. Acesta este utilizat pentru a transmite o lumină modulată, fie de la un senzor optic fără fibre, fie de la un senzor electronic conectat la un transmițător optic [1]. Un avantaj major al senzorilor extrinseci este capacitatea lor de a ajunge în locuri inaccesibile. Aceștia sunt folosiți pentru măsurarea vibrațiilor, rotației, deplasării, vitezei, accelerației, cuplului și temperaturii [2].

În tehnica ce utilizează senzorii de fibră optică intrinseci, fibra optică în sine funcționează ca elementul senzorial. Structura unei fibre optice, în general, constă dintr-o formă cilindrică alungită cu miez de SiO₂ dopat cu Ge cu un indice de refracție de aproximativ 1.54 înglobat într-o sticlă cu IR mai mic, acoperit cu straturi protectoare de plastic, vedeți Fig. 3. 1. a. În Fig. 3. 1. b este prezentat modul prin care un astfel de sistem simplu poate fi modelat să lucreze ca un mecanism de detecție distribuit.

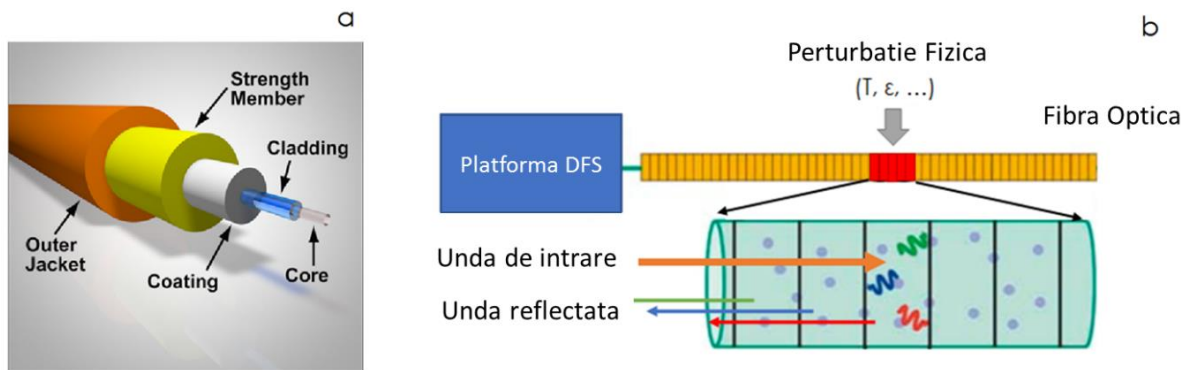


Fig. 3. 1 a). Geometria unei fibre optice [3]. b). Principiul de funcționare al unui sistem de detecție distribuit în fibră. O fibră poate fi modelată ca o secvență de secțiuni adiacente.

Atunci când are loc un anumit eveniment fizic întruna dintre aceste secțiuni de fibre imaginare, lumina este dispersată în secțiunea respectivă cu o frecvență, fază sau amplitudine ușor perturbată. Lumina dispersată este detectată de către o platformă DFS (Distributed Fiber Sensing), care poate individualiza locul evenimentului în lungimea fibrei. Cele trei moduri principale de împrăștiere din fibră sunt asociate cu diferite mecanisme de interacțiune dintre lumina și materie (Fig. 3. 2), cum ar fi împrăștierea elastică (Rayleigh), împrăștierea foton-foton (Brillouin) și împrăștierea neelastică (Raman).

Componentele Raman anti-Stokes pot fi utilizate pentru a obține măsurători de temperatură, în timp ce deformarea și temperatura induc schimbări spectrale în retro-împrăștierea Rayleigh. Împrăștierea Brillouin este sensibilă atât la deformare, cât și la temperatură, și are capacitate de măsurare/detecție a tehnologiilor de împrăștiere pe distanțe foarte mari, până la 100 km [3].

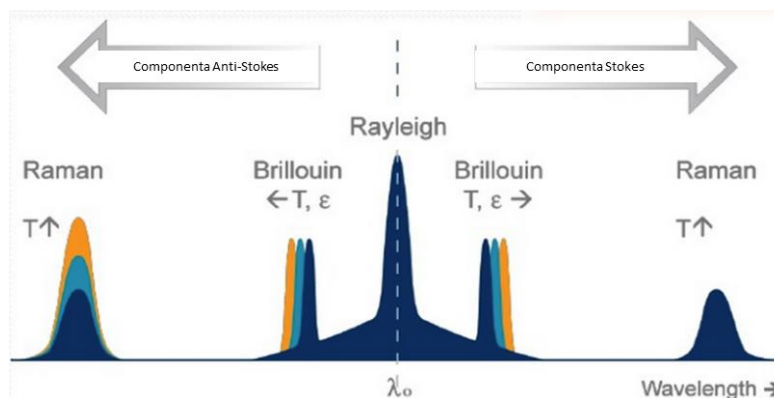


Fig. 3. 2 Procesele de împrăștiere utilizate în aplicații de detecție cu fibre.

Importanța indiscutabilă a tehnicilor de detecție prin fibră optică, dar și versatilitatea acestora, m-au determinat să consider proiectarea și dezvoltarea unui astfel de sistem capabil de detecție atât pe distanțe mari, cât și pe distanțe mici. Însă, pentru realizarea acestui lucru a fost imperios necesară cercetarea stadiului actual al dezvoltărilor acestor tehnici (BOTDA și OFDR) utilizate în construirea unui astfel de sistem. Scopul principal al acestui studiu vizează definirea și identificarea principiilor de funcționare ale tehnicilor BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) și OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry), progreselor realizate de cercetători și ingineri în optimizarea acestora, dar și identificarea limitărilor curente ale acestor tehnici.

3. 2. Analiza stadiului actual al tehnicilor: a) BOTDA și b) OFDR

În tehnicile de detecție pe domeniul de timp este trimis un impuls prin fibră, iar lumina reflectată de fibră în fiecare punct este analizată în domeniul de timp (măsurare time-of-flight). Timpii diferiți corespund diferitelor locații de-a lungul fibrei, iar lățimea impulsului luminii determină rezoluția spațială finală a tehnicii.

Am limitat cercetarea privind tehnologiile-cheie, concentrând atenția asupra Analizei optice Brillouin în domeniul de timp (BOTDA), și a analizei optice de fază în domeniul de timp și a Reflecometrului Optic în Domeniul de Frecvență (OFDR).

3.2.1 Analiza optică Brillouin în domeniul de timp (BOTDA)

Stimulated Brillouin Scattering (SBS) este un efect nelinier neelastic de ordinul al 3-lea, ce în domeniile optice schimbă o parte din energia lor cu dielectrici. Fig. 3. 3 prezintă principiul fundamental de funcționare a împrăștierii Brillouin stimulate. În una din ipotezele cuantice simple, anihilarea unui foton al câmpului injectat, numit pompă, generează un foton la frecvența Stokes deplasată la valori mai mici și un fonon cu energia corespunzătoare, conservând energia totală și impulsul. Pe de altă parte, așa-numitul foton Stokes poate fi creat la energie mai mare, de asemenea, prin absorbția unui fonon cu energie și impuls corespunzătoare. În o ipoteza clasică, SBS este un proces parametric între pompa și Stokes printr-o undă acustică indusă de electrostricțiune datorită existenței câmpurilor electrice. Acest indice de refracție risipește unda de pompare prin difracție Bragg.

În conformitate cu conservarea energiei totale și a impulsului, unda Stokes/anti-Stokes se dovedește a fi împrăștiată înapoi față de unda de lumină incidentă. Diferența între frecvențele luminii incidente și luminii difuze este același BFS (Brillouin Frequency Shift sau ν_B). În timp ce BOTDR (Brillouin Scattering and Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) se bazează pe difuzia spontană Brillouin, BOTDA utilizează SBS pentru a obține o sensibilitate mai mare.

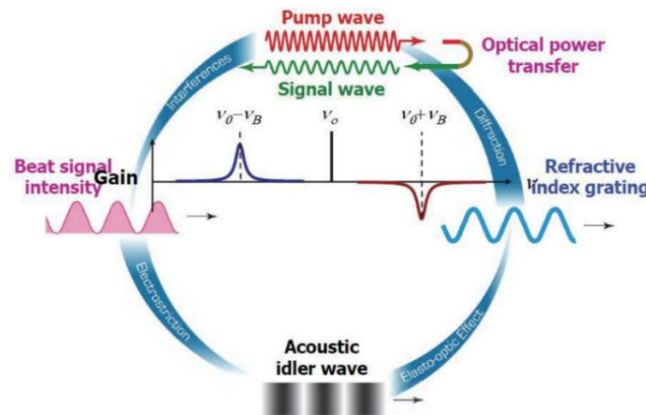


Fig. 3. 3 Mecanismele fizice din spatele SBS [7]

În Fig. 3. 4 este prezentat un sistem tipic BOTDA. Semnalul de ieșire de la un laser CW este divizat printr-un cuplaj 50:50 pentru a genera atât pompa, cât și semnalele de referință. Un EOM este acționat de un generator de impulsuri ce este utilizat pentru a genera un semnal de referință cu fază modulată în amplitudine la o rată de repetiție ridicată în brațul superior al configurației. În brațul inferior, un alt EOM modulează lumina laser cu o undă sinusoidală, care are aceeași frecvență ca BFS și este folosită pentru generarea semnalului de referință Stokes. Ambele semnale ale pompei și de referință sunt, în general, ajustate folosind amplificatoare cu fibre dopate cu Erbium (EDFA - Erbium Doped Fibre Amplifier). Semnalul reflectat Brillouin este izolat folosind o pompă de circulație și se filtrează cu FBG (Fiber Bragg grating), care taie toate armonicilor false.

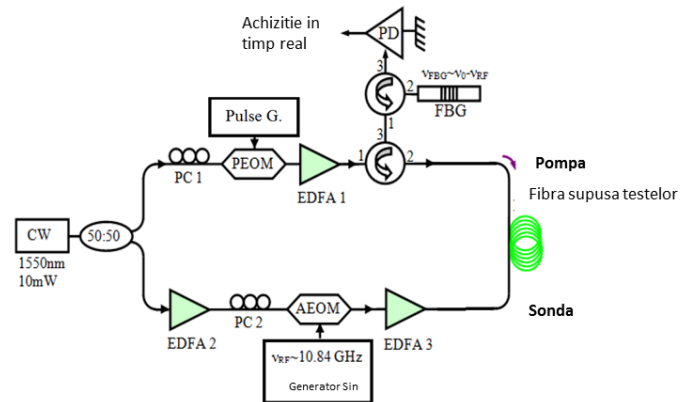


Fig. 3. 4 Configurația tipică de bază BOTDA [9]

Fig. 3. 5 prezintă un exemplu tipic al SBS reflectată de o fibră optică în cazul în care un punct la capătului sau este tensionat, un fotodetector, un sistem de achiziție de date și de procesare și analiza SBS.

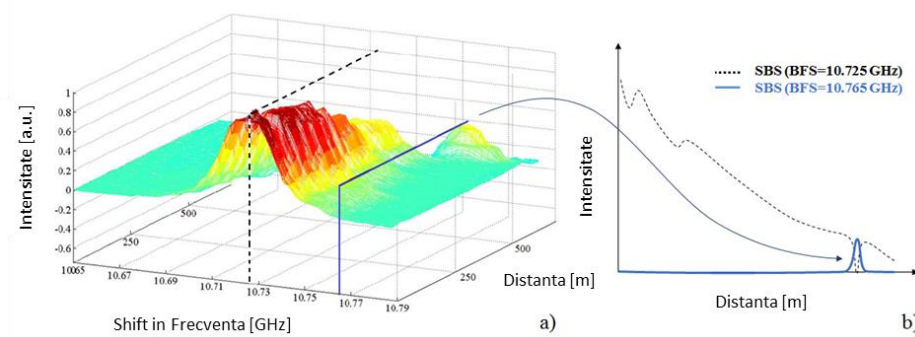


Fig. 3. 5 Achiziția și analiza SBS pe Domeniul Frecvență – Timp/Distanță (a). Grafic cu domeniul Timp/Distanță al aceeași scanări peste două frecvențe (b) [9]

Configurația necesară pentru tehnica BOTDA are nevoie de acces la ambele capete ale fibrei, deoarece pompa și referință CW trebuie să se contra-propage în fibră. Acest lucru poate fi considerat o limitare în anumite situații. Pentru ca împrăștierea Brillouin este un efect dependent de polarizare, atunci când se utilizează fibre cu menținerea polarizării, starea de polarizare poate fi menținută pe o distanță lungă, cu condiția ca polarizarea inițială să fie orientată fie de-a lungul axei rapide, fie a celei lente a fibrei. Atunci când se utilizează fibre cu un singur mod, stările de polarizare sunt întâmplătoare de-a lungul acestora, datorită fluctuațiilor aleatorii ale birefringentei

fibre cauzate de fluctuațiile în forma de bază și stresul neuniform ce acționează asupra miezului, astfel este necesară o mediere a efectului Brillouin peste toate stările de polarizare.

Configurația ce utilizează tehnica BOTDA este încă în curs de dezvoltare, prezentând un progres constant. Printre soluții sunt propuse metode pentru extinderea limitei de detecție și îmbunătățirea rezoluției spațiale.

3.2.2. Reflectometru Optic în Domeniul de Frecvență (OFDR)

Toate tehnicile OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometer) folosesc împrăștierea Rayleigh pentru a interoga simultan mai multe grile FBG de joasă frecvență cu reflectivitate scăzută sau fibre simple, care acționează în calitate de senzori de deformare și/sau temperatură de-a lungul unei singure fibre optice.

Beneficiile esențiale ale tehnologiei OFDR sunt legate de modul unei quasi continue generate de laser și detectarea în bandă îngustă a semnalului optic retro-împrăștiat, prin care un semnal semnificativ mai mare în raport cu zgomotul este realizat în comparație cu tehnologia de impulsuri convenționale OTDR (Optical Time Domain Reflectometry), sau BOTDA. Acest beneficiu tehnic permite utilizarea unor diode laser semiconductoare accesibile și a unor ansambluri electronice pentru medierea de semnal. Acest lucru este compensat de dificultatea tehnică de a măsura lumina Raman împrăștiată și de procesarea de semnal complexă, datorită calculelor FFT (Fast Fourier Transformation) cu cerințe de liniaritate ridicate pentru componentele electronice. Deși montajul experimental este relativ simplu, algoritmi pentru a descifra temperatura locală și/sau variațiile de deformare sunt mai complecși decât cei utilizați în cele mai multe tehnici pe domeniu de timp.

Tehnicile OFDR folosesc împrăștierea Rayleigh pentru a interoga simultan mai multe sute de grile Bragg (FBG) cu reflectivitate scăzută care acționează ca senzori de deformare sau de temperatură de-a lungul unei singure fibre optice. Semnalul optic retro împrăștiat interferează cu reflexia luminii de referință, care servește drept oscilator local, astfel rezultând o interferogramă complexă dar cu o schemă optică simplă (Fig. 3. 6).

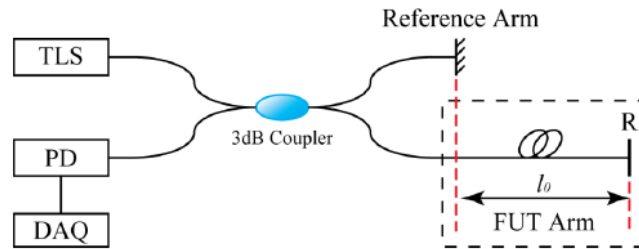


Fig. 3. 6 Schema unui sistem OFDR [26]

De asemenea, C-OFDR și Interogatorul de Fază Kerr OFDR pot fi utilizate ca soluții pentru creșterea rezoluției spațiale, și a fost arătat că acestea permit atingerea unei rezoluții de până la 6 mm, pe un domeniu de 3 metri, respectiv a uneia de 11.2 cm pentru domenii de peste 151 km. Chiar dacă aceste cifre sunt impresionante, mai sunt și alți parametri ce trebuie luați în considerare. Alte limitări fundamentale ale OFDR sunt raza de detecție și rezoluția de detecție.

3. 3. Concluzii

A fost realizat cu succes un studiu de literatură pentru a înțelege cât mai precis principiile de funcționare ale tehnicilor de detecție prin fibră optică, dar și progresele realizate de cercetători și ingineri în dezvoltarea și optimizarea acestora. Analiza a vizat, de asemenea, și evaluarea limitărilor tehnicilor de detecție prin fibră optică, permițând astfel să identificăm configurațiile optime pentru construirea unor astfel de sisteme.

Altfel spus, limitările acestor tehnici nu permit realizarea unui singur sistem de detecție prin fibra optică care să fie capabil de funcționare atât pe distanțe mici, cât și pe distanțe mari. Astfel, pentru a avea un sistem de detecție pe distanță mare, și anume de aproximativ 100 km, cu o rezoluție de 1 m, se va construi un sistem folosind tehnica de detecție BOTDA. Procesul de dezvoltare, testare și implementare al sistemului în baza tehnicii BOTDA va fi prezentat în detaliu în următorul capitol. Iar pentru construirea unui sistem de detecție care să funcționeze optim pe distanțe mici, și anume de maxim câțiva zeci de metri, dar cu o rezoluție de câțiva μm , vom utiliza tehnica de detecție OFDR. Procesul de dezvoltare, testare și implementare al sistemului în baza tehnicii OFDR va fi prezentat în penultimul capitol.

3. 4. Referințe

- [1] Y.-J. Rao, Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry–Perot interferometric sensors, vol. 12, *Optical Fiber Technology*, 2006, pp. 227-237.
- [2] C. R. D. L. F. S. a. F. H. U. Roland, A new fiber optical thermometer and its application for process control in strong electric, magnetic, and electromagnetic fields, vol. 1, *Sensor Letters*, 2003, pp. 93-98.
- [3] E. Udd, „Fiber optic sensors,” 1993.
- [4] Corning, „Basic Principles of Fiber Optics, Corning Cable Systems.,” (2005, 12 Apr). [Interactiv]. Available: www.corningcablesystems.com/web/college/fibertutorial.nsf/ofpara.
- [5] J. C. Palais, *Fiber optic communications*: Prentice Hall Englewood Cliffs, 1988.
- [6] J. C. J. a. H. F. Taylor, „Distributed fiber optic intrusion sensor system for monitoring long perimeters,” in *Defense and Security*,” 2005, pp. 692-703.
- [7] T. K. a. M. T. T. Horiguchi, „Technique to measure distributed strain in optical fibers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, pp. 352-354, 1990.
- [8] L. T. a. P. A. R. M. Nikles, „Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis,” *Optics letters*, vol. 21, pp. 758-760, 1996.
- [9] Y. Mao, „Distributed optical fibre sensing system based on Brillouin scattering,” *The Hong Kong Polytechnic University*, 2014.
- [10] S. F. Mafang, „Brillouin Echoes for Advanced Distributed Sensing in Optical Fibres,” 2011.
- [11] L. Thévenaz, „Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives,” *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, pp. 13-21, 2010.
- [12] A. D.-L. A. L.-G. J. A.-C. S. M.-L. a. M. G.-H. X. Angulo-Vinuesa, „Rating the limitations and effectiveness of BOTDA range extension techniques,” *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)*, vol. 4, pp. 96346R-96346R, 2015.
- [13] J. W. B. S. S. R. N. L. Z. M. C. A. E. W. a. M. T. A. Voskoboinik, „SBS-based fiber optical sensing using frequency-domain simultaneous tone interrogation,” *Journal of lightwave technology*, vol. 29, pp. 1729-1735, 2011.

- [14] A. C. R. B. a. L. Z. A. Minardo, „Heterodyne slope-assisted Brillouin optical time-domain analysis for dynamic strain measurements,” *Journal of Optics*, vol. 18, p. 025606, 2016.
- [15] A. M. a. M. T. ". B. o. t. d. a. f. d. s. Y. Peled, „Optics express,” vol. 20, pp. 8584-8591, 2012.
- [16] N. H. H. F. K. Y. S. a. K. N. Y. Mizuno, „Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry,” *Light: Science and Applications*, vol. 5, 2016.
- [17] [Interactiv]. Available: http://www.neubrex.com/htm/technology/kouseido_2.htm.
- [18] D. J. W. C. N. P. a. D. A. J. V. Lecoecuche, „Transient response in high-resolution Brillouin-based distributed sensing using probe pulses shorter than the acoustic relaxation time,” *Optics letters*, vol. 25, pp. 156-158, 2000.
- [19] X. B. Y. W. a. L. C. L. Zou, „Coherent probe-pump-based Brillouin sensor for centimeter-crack detection,” *Optics letters*, vol. 30, pp. 370-372, 2005.
- [20] B. G. C. a. K. B. A. W. Brown, „Dark-pulse Brillouin optical time-domain sensor with 20-mm spatial resolution,” *Journal of lightwave technology*, vol. 25, pp. 381-386, 2007.
- [21] L. T. a. S. F. Mafang, „Distributed fiber sensing using Brillouin echoes,” *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, pp. 70043N-70043N-4, 2008.
- [22] K. I. a. J. N. J. Nakayama, „Optical fiber fault locator by the step frequency method,” *Applied optics*, vol. 26, pp. 440-443, 1987.
- [23] M. N. a. S. A. N. D. W. Dolfi, „5-mm-resolution optical-frequency-domain reflectometry using a coded phase-reversal modulator,” *Optics letters*, vol. 13, pp. 678-680, 1988.
- [24] M. W. V. M. P. M. K. Yuksel, „Optical frequency domain reflectometry: A review,” în *11th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2009.
- [25] R. MacDonald, „Frequency domain optical reflectometer,” *Applied optics*, vol. 20, pp. 1840-1844, 1981.
- [26] J. Song, „Optical Frequency Domain Reflectometry: Sensing Range Extension and Enhanced Temperature Sensitivity.,” *Université d'Ottawa/University of Ottawa*, 2014.

Capitolul 4:

Realizarea noului sistem AFM și performanțele demonstrate cu succes a acestuia în laborator

4. 1. Introducere

Tehnica microscopiei de forță atomică (AFM) generează un tip de microscop cu o rezoluție foarte înaltă, de ordinul fracțiunilor de nm, rezoluție ce este de 1000 de ori mai bună decât a microscopelor optice [1, 2].

Schema de funcționare a acestui dispozitiv ce folosește tehnica forțelor atomice este prezentată în Fig. 4. 1 și a fost descrisă în detaliu în capitolul doi.

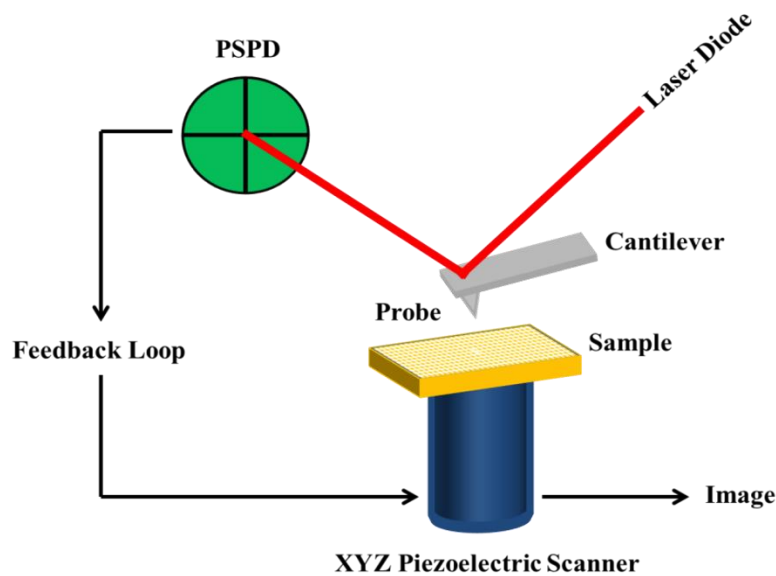


Fig. 4. 1 Configurația experimentală a unui sistem AFM

Obiectivul final al acestei teze are ca scop proiectarea și dezvoltarea unui microscop cu forțe atomice cu multiple elemente de originalitate (cap de măsură cu un nou design, noi module

electronice, platforma software nouă etc.) capabil să lucreze atât în mod contact la rezoluție atomică, cât și în mod non-contact cu o rezoluție verticală de 0.01 nm, capabil de imagistică pe arii reduse, dar și arii extinse (de până la aproximativ $50 \times 50 \mu\text{m}^2$), în multiple medii (condiții ambientale, în mediu cu umiditate controlată, în mediu de gaze inerte sau în vid până la 10^{-4} torr).

4.2. Proiectarea și dezvoltarea ansamblelor necesare pentru construirea sistemului AFM

Microscopul de Forță Atomică (AFM) este un echipament complex de caracterizare fiind realizat prin asamblarea diferitor componente, motiv pentru care, pentru a spori eficiența în procesul de construire a unui astfel de sistem, o divizare a activităților de proiectare, dezvoltare și/sau asamblare a elementelor necesare este extrem de utilă. Astfel, construirea microscopului de forță atomică (AFM), ce face obiectul acestei teze de doctorat, a fost realizată prin gruparea subansamblelor necesare în două categorii principale. În prima parte au fost proiectate și dezvoltate elementele optice și cele mecanice, iar în cea de-a doua parte a fost proiectată și realizată electronica de control a sistemului.

4.2.1. Componentele optice și mecanice

Elementele ce alcătuiesc subansamblele optice și mecanice, necesare pentru construirea sistemului AFM și care trebuie proiectate, dezvoltate și/sau asamblate, sunt următoarele: (1) bază microscop de forțe atomice; (2) sistem de scanare piezoelectric; (3) cap de măsură și (4) sistem optic de detecție. Astfel sistemul rezultat se poate observa în Fig. 4. 2.

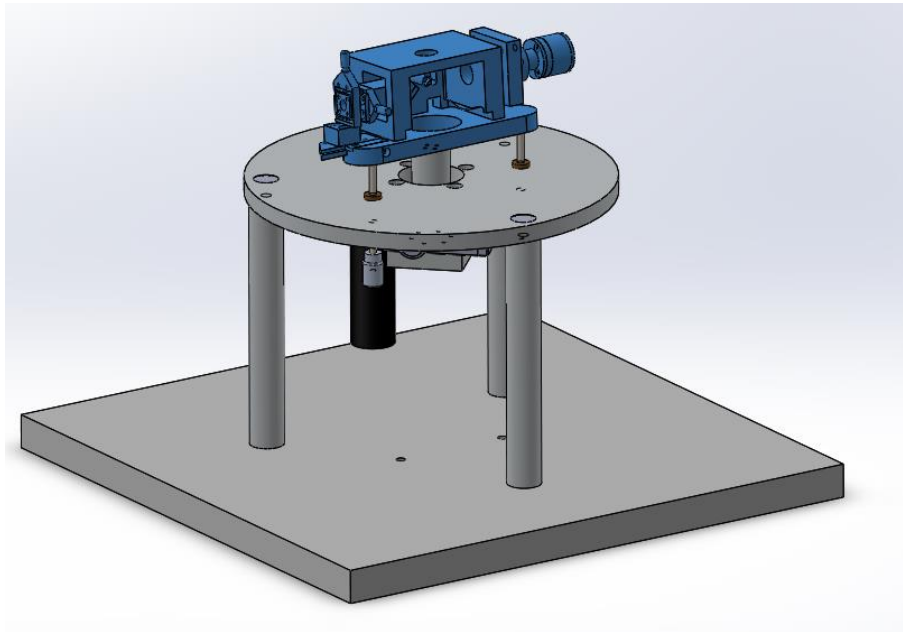


Fig. 4. 2 Sistem AFM complet

4.2.2. Electronica (unitatea de control) a sistemului AFM

Microscopul cu forțe atomice este împărțit în trei mari secțiuni: (1) capul de citire, (2) unitatea centrală și (3) unitatea digitală de achiziție, procesare și control a datelor.

Din punct de vedere electronic microscopul de forțe atomice este compus din următoarele blocuri componente:

1. Modulul preamplificator;
2. Modulul de interconexiune A;
3. Modulul de interconexiune B;
4. Modulul de interconexiune C;
5. Sursa de alimentare;
6. Amplificatorul de înaltă tensiune.

Modulul preamplificator asigură amplificarea semnalului captat de fotodetectorul cu patru cadrane, alimentat de dioda laser și realizează operațiile matematice între cele 4 canale amplificate pentru a furniza informațiile de semnal Normal, Lateral și Total, semnale utile în generarea de imagini ale suprafeței scanate.

Modulul de interconexiune A asigură conectarea între blocul digital de achiziție și control, sursa de alimentare și restul blocurilor componente ale sistemului. Nu conține componente active.

Modulul de interconexiune B asigură conectarea între preamplificator, ansamblul tubului piezoelectric, modulul de interconexiune A, ecranul tactil, ieșirea amplificatoarelor de înaltă tensiune și restul sistemului. Acesta conține un bloc de amplificare pentru cele 4 semnale primite de la preamplificator, un bloc de amplificare pentru elementul piezoelectric de excitație a vârfului, un bloc de control al motorului ce controlează apropierea și depărtarea vârfului de probă și un bloc de comutare a tensiunii aplicate pe secțiunile tubului piezoelectric.

Modulul de interconexiune C asigură conectarea condensatoarelor de liniarizare între amplificatoarele de înaltă tensiune și modulul de interconexiune B. Acest modul nu conține componente electronice active.

Sursa de alimentare este o sursă de tip liniar, de zgomot mic, compusă din mai multe secțiuni, cu o putere totală de 450W, care asigură alimentarea tuturor componentelor sistemului SPFM. Furnizează următoarele tensiuni stabilizate $\pm 5V$, $\pm 12V$, $\pm 480V$ și o tensiune nestabilizată de 12V. În componența sursei de alimentare a fost introdus și un modul de decuplare automată a înaltei tensiuni la detecția unei temperaturi ridicate la nivelul radiatoarelor de răcire.

Amplificatorul de înaltă tensiune a fost conceput să poată furniza o tensiune de maxim $\pm 450V$, la un curent de minim 100mA, pentru a putea satisface necesitățile de deplasare a tubului piezoceramic, în configurația de liniarizare prin metoda inserării unui condensator.

Amplificatorul a fost realizat în tehnologie MOS-FET pentru etajele final și prefinal, datorită tensiunilor foarte ridicate la care trebuie să lucreze aceste etaje.

4. 3. Concluzii

Elementele optice și cele mecanice, dar și electronica de control a sistemului au fost proiectate, dezvoltate și asamblate cu succes, construindu-se astfel un microscop de forță atomică funcțional.

Funcționalitatea sistemului AFM construit „in house” a fost testată și experimental. În acest scop a fost selectat un grid de calibrare special pentru sisteme AFM, și anume TGZ01, acesta având o treaptă (z) de 20 nm, neprezentând un efort foarte mare pentru bucla de feedback a

sistemului. Imaginile topografice obținute sunt prezentate în Fig. 4. 3 atât în proiecție 2D, cât și 3D.

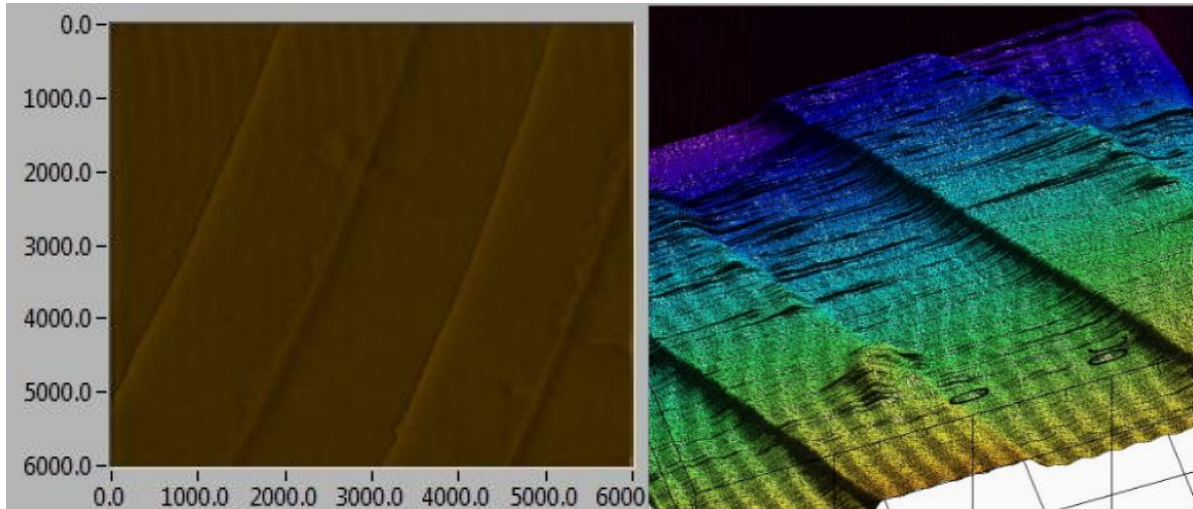


Fig. 4. 3 Imagine de topografie pentru gridul de calibrare TGZ01; în stânga profil 2D iar în dreapta profil 3D

Prin scanarea cu succes a gridului TGZ01 a fost demonstrată funcționalitatea sistemului. Așadar, pentru a testa sistemul în condiții mai dificile s-a decis scanarea unui alt grid de calibrare, și anume TGZ02, ce forțează limitele sistemului, acesta având o treaptă (pe z) de 110 nm. După cum se poate observa în Fig. 4. 4 și Fig. 4. 5, sistemul este capabil să scaneze suprafețe mari (zeci de microni) și să detecteze variații de înălțime destul de mari pe Z, adică proprietăți topografice.

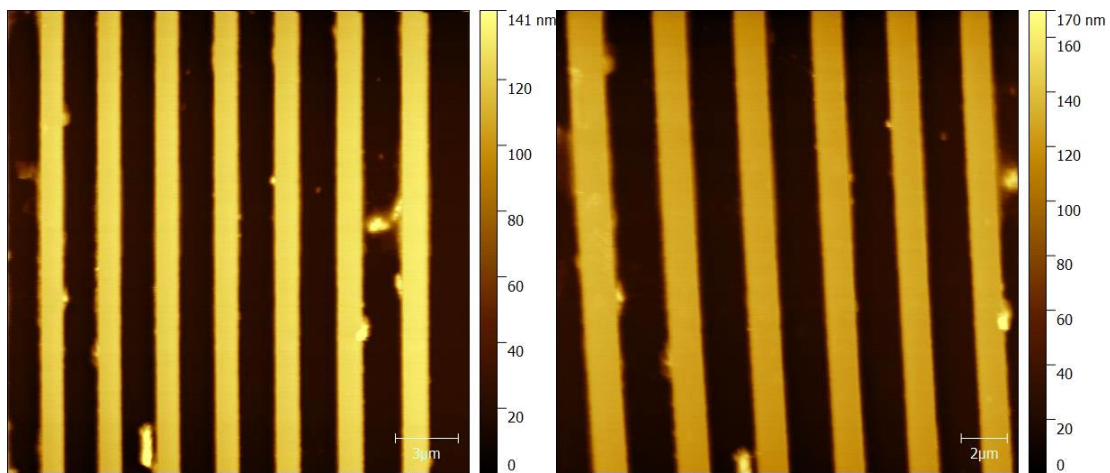


Fig. 4. 4 Imaginile obținute pe TGZ02

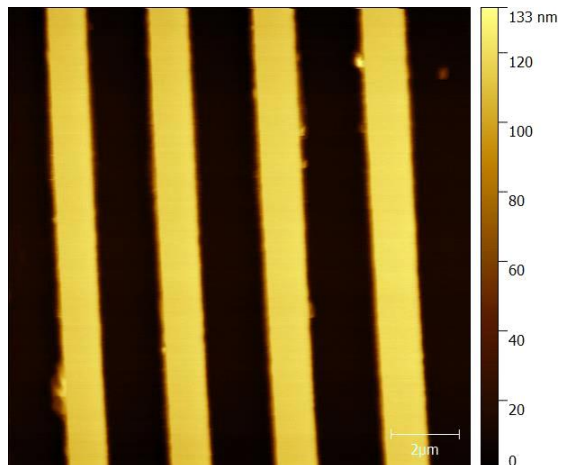
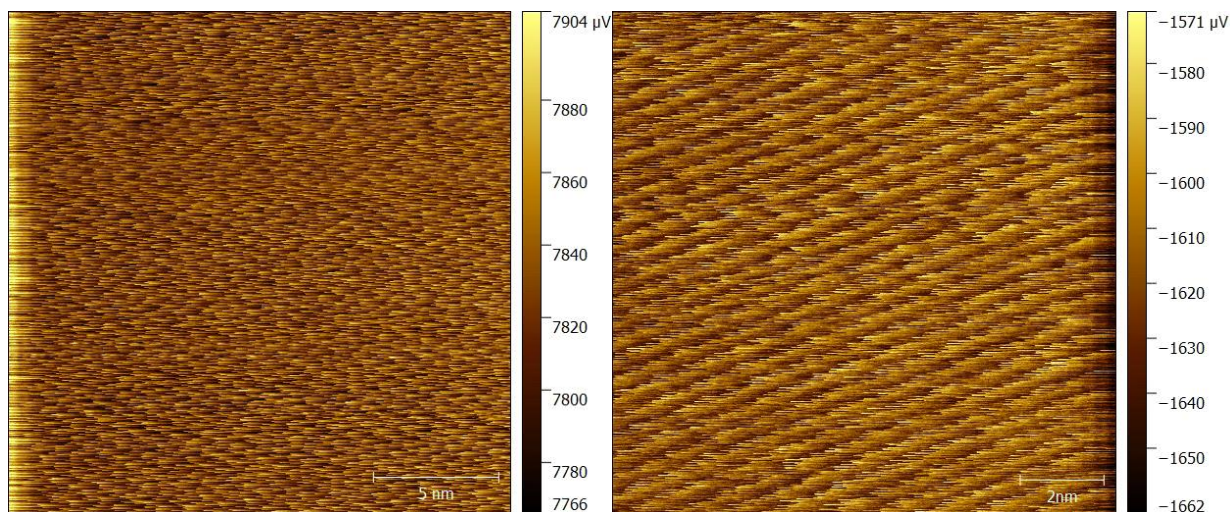


Fig. 4. 5 Mărirea unei zone de pe TGZ02

În baza studiilor efectuate pe cele două griduri de calibrare, TGZ01 și TGZ02, poate fi concluzionat ca sistemul AFM construit este capabil să înregistreze proprietăți morfologice cu variații notabile de înălțime fără dificultăți.

Pentru testarea limitelor sistemului, adică a celei mai sensibile părți, și anume scanarea la dimensiuni foarte mici în încercarea de a obține imagini la rezoluția atomică în condiții ambientale (temperatura camerei, umiditate RH 55%), s-a utilizat o probă de mică proaspăt clivată, uniform. Rezultatele obținute sunt promițătoare, evidențiind atomii de pe suprafața micăi, inclusiv distribuție acestora în celula elementară corespunzătoare micăi, după cum se poate observa în Fig. 4. 6.



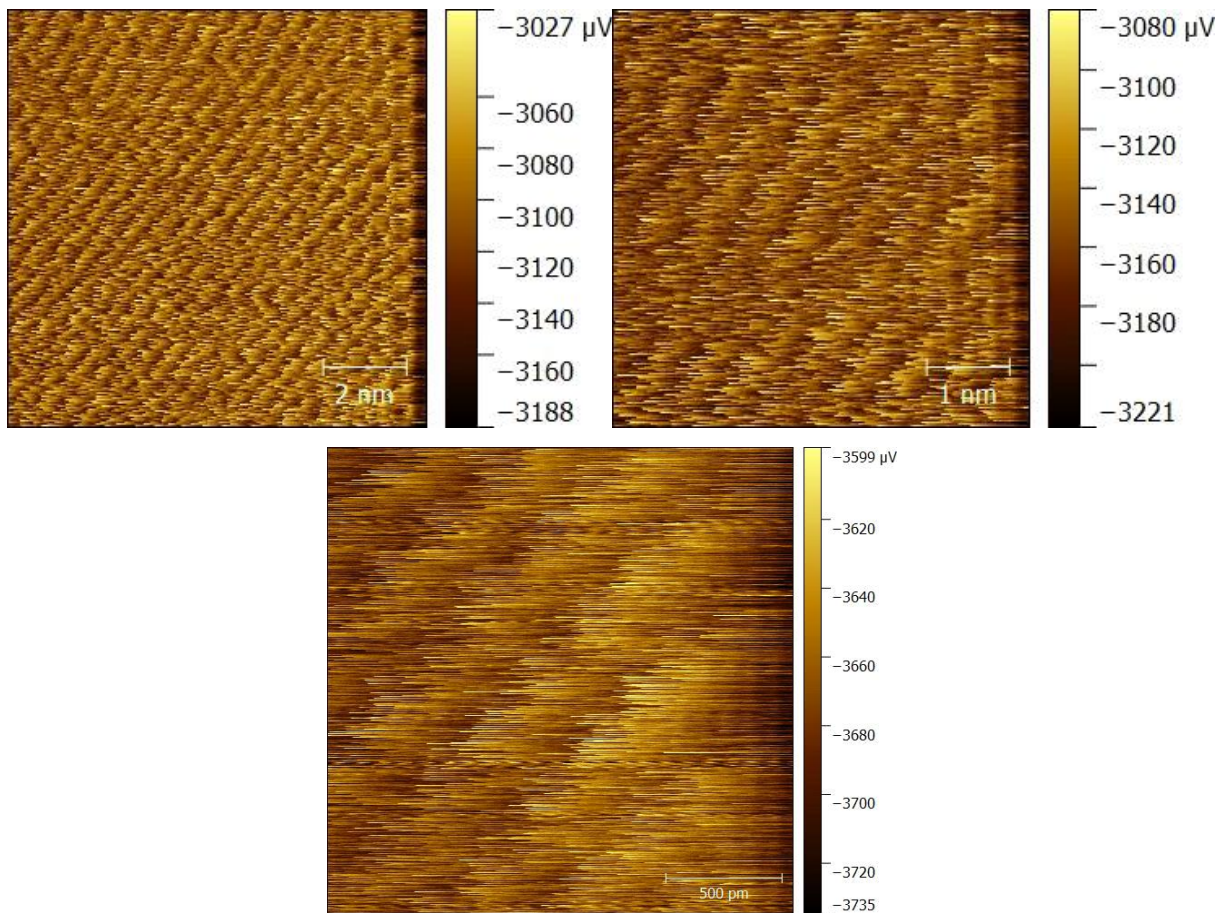


Fig. 4. 6 Rezoluția atomică obținută cu microscopul de forțe atomice construit „in house”

Faptul ca sistemul AFM construit este capabil de imagistică la rezoluție atomică demonstrează capacitatea acestuia de a atinge cele mai înalte rezoluții în toate modurile AFM uzuale, precum AFM topografie, AFM-conductive etc.

4. 4. Referințe

- [1] K. S. Birdi, Scanning Probe Microscopes, Applications in Science and Technology, eBook ISBN: 9780429214820, CRC Press, 2003.
- [2] P. W. Peter Eaton, Atomic Force Microscopy, New York: Oxford University Press Inc., ISBN 978-0-19-957045-4 (Hbk.), 2010.

Capitolul 5

Realizarea unui sistem de detecție pe distanță mare (tehnica BOTDA).

Performanțe în laborator cu sistemul dezvoltat

5. 1. Introducere

În senzorii de fibră optică intrinseci din tehnica de detecție distribuită, fibra optică în sine funcționează ca elementul senzorial. Structura unei fibre optice, în general, constă dintr-o formă cilindrică alungită, miez de SiO₂ dopat cu Ge cu un indice de refracție de aproximativ 1.54, înglobat într-o sticlă cu IR inferior, acoperit cu straturi protectoare de plastic, vedeți Fig. 5. 1 a. În Fig. 5. 1 b este prezentat modul prin care un astfel de sistem simplu poate fi modelat să lucreze cu un mecanism de detecție distribuit [1, 2, 3].

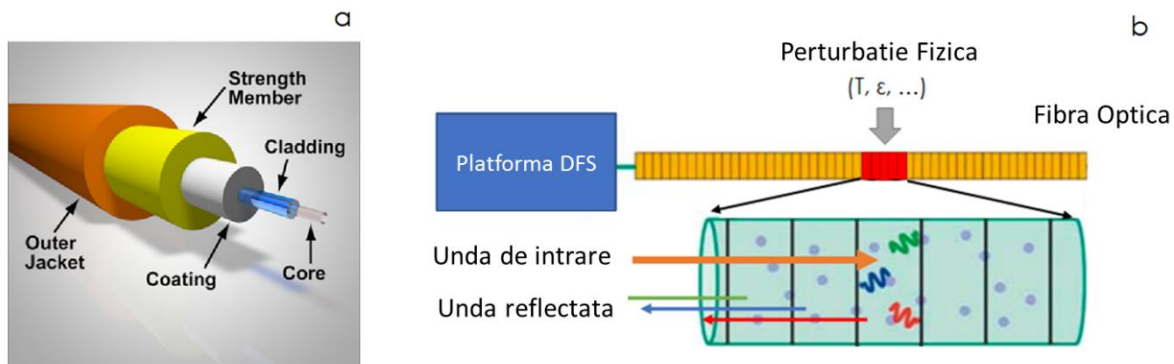


Fig. 5. 1 a). Geometria unei fibre optice, cu manta exterioară [4]. b). Principiul de funcționare al unui sistem generic DFS. O fibră poate fi modelată ca o secvență de secțiuni adiacente. O perturbatie fizică (de exemplu, schimbarea de temperatură, deformare, unda acustică etc.) schimbă starea locală a fibrei, astfel rezultând o modificare în unda de lumină reflectată

Atunci când are loc un anumit eveniment fizic într-una dintre aceste secțiuni de fibre imaginare, lumina este dispersată în secțiunea respectivă cu o frecvență, fază sau amplitudine ușor

perturbată. Lumina dispersată este detectată de către o platformă DFS, care poate individualiza locul evenimentului în lungimea fibrei.

Un sistem tipic utilizat pentru implementarea BOTDA este prezentat în Fig. 5. 2 iar principiul de funcționare a fost detaliat în capitolul trei.

Descompunerea semnalului găsit pe axa distanță (timp) se datorează pierderii de energie a semnalului de-a lungul fibrei. Energia este risipită la o frecvență de diferență, care este liniar corelată cu cantitatea de deformării sau a temperaturii aplicate în punctul respectiv (Fig. 5. 3).

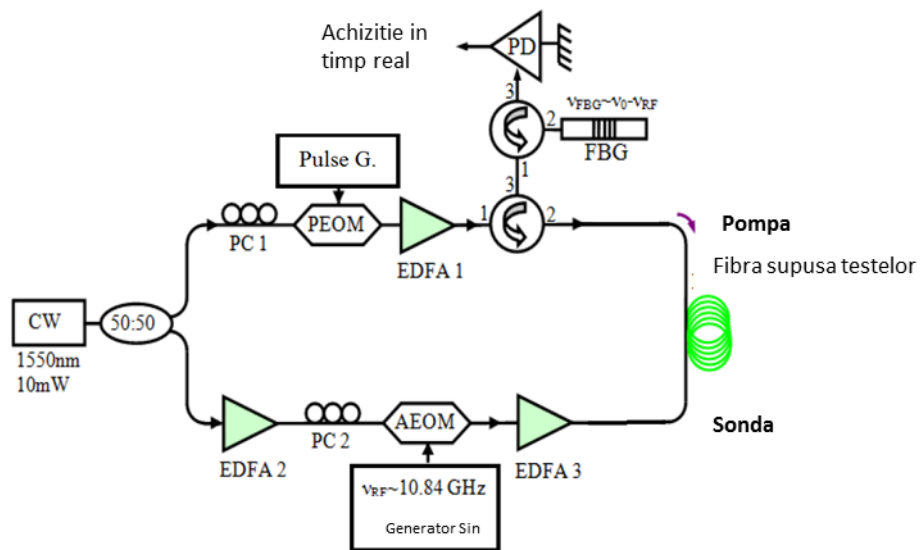


Fig. 5. 2 Configurația tipică de baza BOTDA [6]

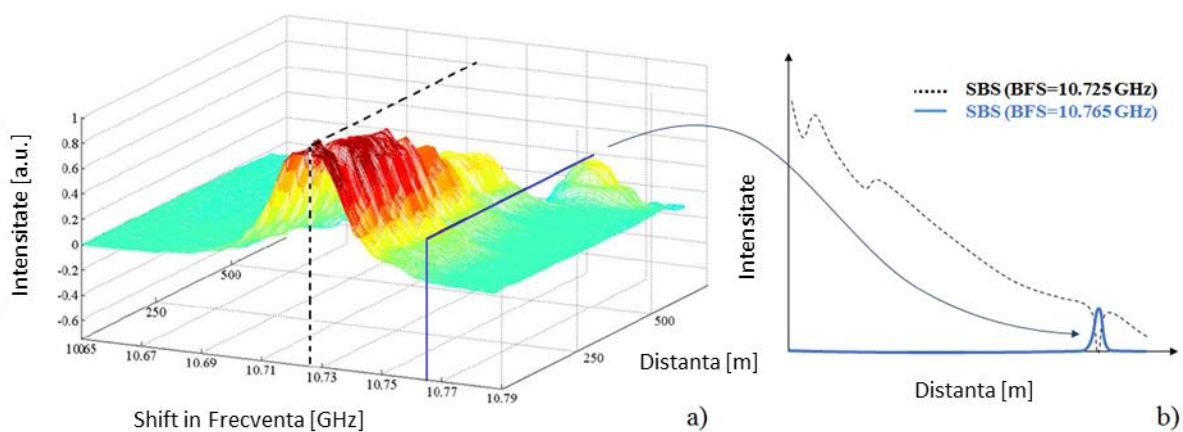


Fig. 5. 3 Achiziția și analiza SBS pe Domeniul Frecvență – Timp/Distanță (a). Grafic cu domeniul Timp/Distanța al aceleași scanări peste două diferențe (b) [6]

Configurația ce folosește tehnica BOTDA necesită acces la ambele capete ale fibrei, deoarece pulsul pompă și referință CW (continuous wave laser) trebuie să se contra-propage în fibra de detectare. Acest lucru poate fi considerat ca o limitare, în anumite situații.

5. 2. Implementarea sistemului de detecție BOTDA

Implementarea sistemului de detecție pe distanță mare ce folosește tehnica BOTDA presupune realizarea a trei pași principali:

- (1) Partea de electronică;
- (2) Partea de electronică, optică și mecanică.
- (3) Programul software.

5.2.1. BOTDA: Partea de electronică

Dezvoltarea/implementarea părții electronice presupune realizarea tuturor ansamblelor și subansamblelor electronice necesare în componența sistemului de detecție pe distanță mare. Componenta majoră a acestei părți ce trebuie realizată este sursa de tensiune ce se ocupă cu furnizarea voltajelor și a curenților corespunzători fiecărui element ce intră în componența sistemului:

- sursa de tensiune (sistemul are un consum mic de putere, de doar ~120W, însă una din surse trebuie sa fie cu zgomot redus).
- placa de interconexiuni (se ocupă cu distribuția tensiunilor și a curenților către elementele sistemului).
- circuite auxiliare (ADC 16 biti, ADS1115, si AD8065 pentru fotodetector EOM)
- Achiziția de date (AD14-500 de la Ultraview, pentru a satisface capacitatea de achiziție a unei cantități masive de date într-un timp cât mai scurt)

5.2.2. BOTDA: electronica, optica și mecanica

Aceasta etapa de dezvoltare vizează toate elementele din configurația sistemului, inclusiv partea de electronică, deoarece acestea nu pot fi separate foarte clar. Practic pentru a realiza asamblarea efectiva a sistemului de detecție pe distanță mare avem nevoie de toate elementele de electronică, optică și mecanică. Astfel, înainte de a începe procesul de asamblare a sistemului de

detecție pe distanță mare, trebuie întotdeauna considerată schema optică a sistemului. Aceasta schemă se poate observa în imaginea din Fig. 5. 4.

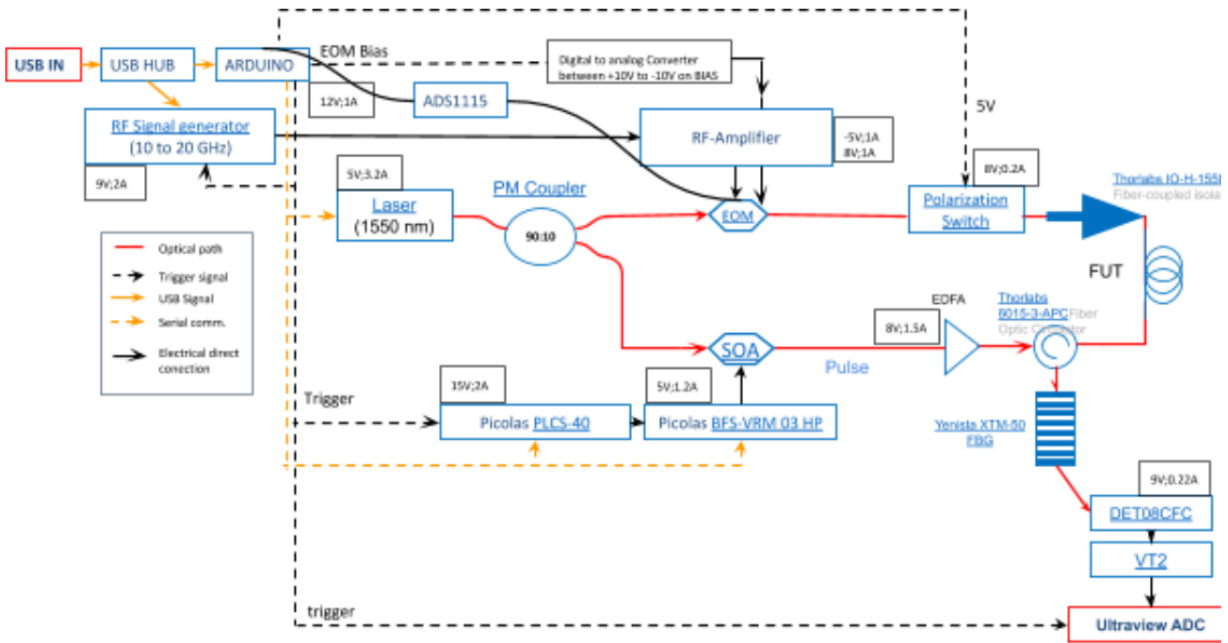


Fig. 5. 4 Schema electronica și optica a sistemului BOTDA

Practic în acest capitol este prezentat procesul de asamblare a dispozitivului BOTDA de la început (Fig. 5. 5 în partea stângă) pana in etapa finala (Fig. 5. 5 în partea dreaptă).



Fig. 5. 5 În partea stângă primul element adăugat in cutie, iar in partea dreaptă ultimul pas.

5.2.3. Interfața software pentru BOTDA

Pentru sistemul de detecție pe distanță mare au fost dezvoltate 2 platforme software, pentru a avea un sistem receptiv și eficient. Acest lucru este necesar și datorită cantității mare de date generate în timpul unei achiziții efective. Astfel, va exista o platformă software ce se ocupă cu partea de achiziție de date și o platformă ce se ocupă cu partea de procesare de date.

5.2.3.1. Platforma software – achiziție de date

În imaginea din Fig. 5. 6 este prezentată pe scurt interfața LabVIEW a platformei software dezvoltată.

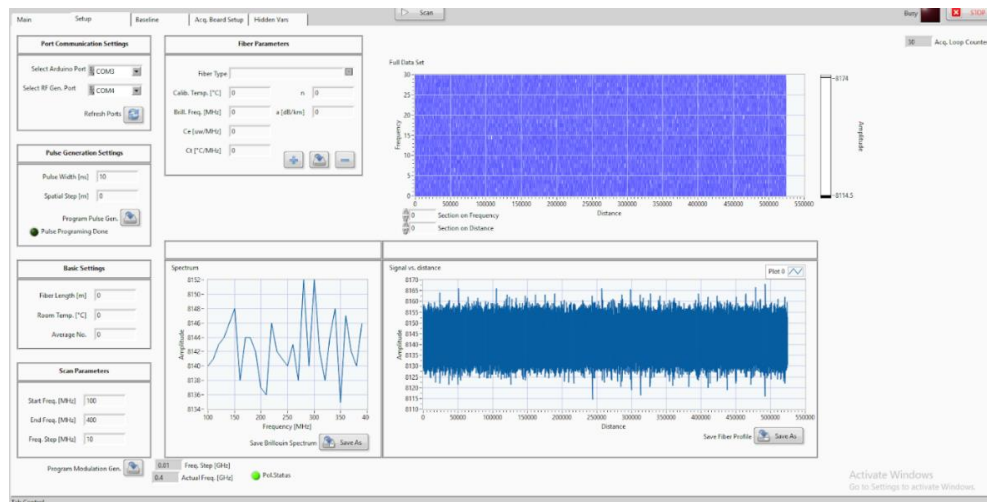


Fig. 5. 6 Interfața LabVIEW a platformei software

În spatele interfeței grafice funcționează o mașină de stări care conține următoarele opțiuni: (1) Init, (2) Init2, (3) Idle, (4) InitScan, (5) FreqandPol, (6) Scan, (7) IniAcq, (8) Acq, (9) Refresh_Graphs, (10) SendPulseConfig, (11) Refresh_Ports, (12) SendModConfig, (13) Exit și (14) Save.

5.2.3.2. Platforma software – procesare date

Platforma software pentru procesarea datelor (Fig. 5. 7) permite încărcarea a 3 seturi de date concomitent pentru a realiza procesarea acestora. Însă unul dintre aceste seturi trebuie să fie setul de referință, restul fiind date experimentale.

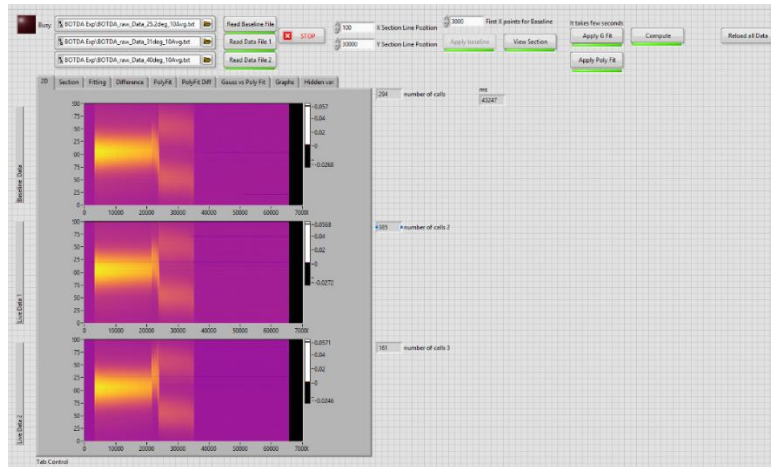


Fig. 5. 7 Noua interfață de lucru a programului LabVIEW

Astfel a fost creată o zonă împărțită în tab-uri care oferă informațiile în funcție de operațiunea executată. Programul știe să comute automat între tab-uri, în funcție de operațiunea efectuată.

Această implementare cu tab-uri a programului implementat în LabVIEW permite o vizualizare mai ușoară și mai compactă a informațiilor necesare pentru analiza seturilor de date. În același timp, programul funcționează mai fluid și mai ușor, deoarece nu este nevoie să reîmprospăteze toate graficele din program, ci doar cele vizualizate în acel moment.

5.2.4. Rezultate obținute cu platforma BOTDA

Primele seturi de date generate de această platformă au fost achiziționate cu ZHInst, iar prima imagine a fost rampa caracteristică tehnicii BOTDA pentru o fibră optică de 50 km.

Utilizând laserul Koheron reglat cu 100 mA aplicați, împreună cu un puls optic de 100 ns în lungime împreună cu conectarea unei terminații de 50 ohm, potrivirea atenuării, în momentul în care a fost baleiat filtrul yenista a fost realizată achiziționarea de date precum cele din imaginea prezentată în Fig. 5. 8.

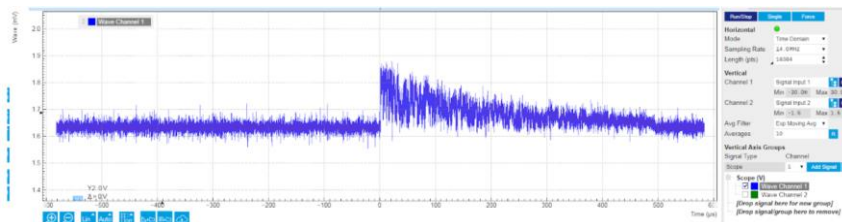


Fig. 5. 8 BOTDA achiziționat după fine tune-up

Astfel, odată obținute aceste rezultate, deci implicit obținută reglarea sistemului, a putut fi efectuată o serie de experimente, cel mai simplu și rapid experiment ce poate fi realizat fiind cel de temperatură. Astfel, au fost unite 3 role de fibră optică iar rola din jumătate a fost scufundată într-o baie cu apă unde avem posibilitatea de a crește temperatura în mod controlat

9. In acest experiment au fost înregistrate 3 seturi de date, unul la 25 °C, următorul la 33 °C iar ultimul la 45 °C. Aceste date sunt reprezentate grafic (in același grafic) în imaginea din Fig. 5.

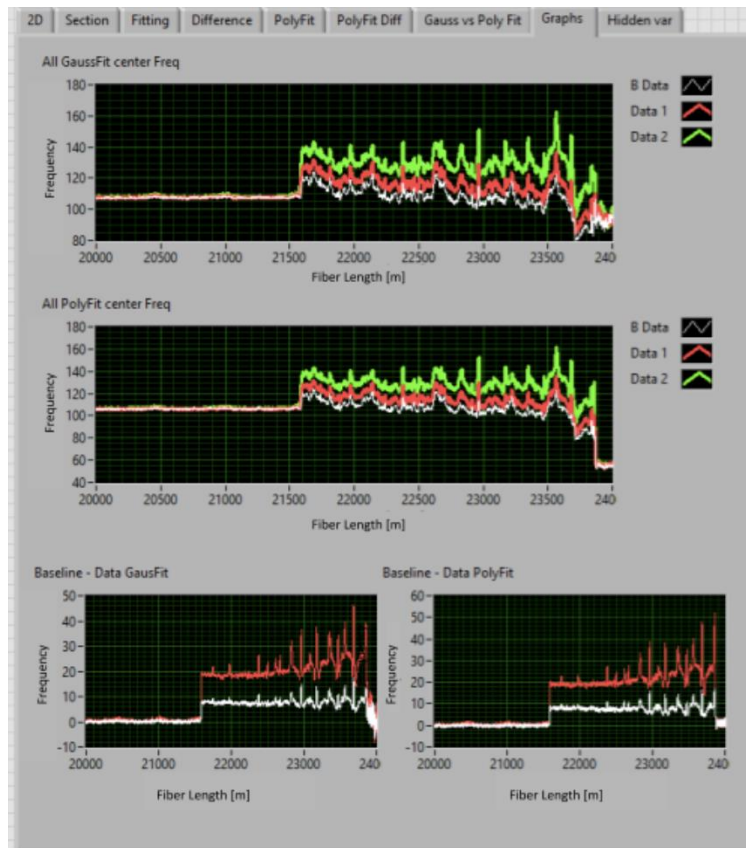


Fig. 5. 9 Captură de ecran a interfeței de utilizator LabVIEW care compară Fitingul Gaussian și Fitingul Polinomial pentru determinarea deplasărilor de frecvență de-a lungul fibrei optice. Curbele verzi, roșii și albe arată înregistrările pentru o temperatură de 25 °C, 33 °C și respectiv 45 °C

5.3. Concluzii

În baza studiului de literatură efectuat și prezentat în Capitolul 3, a fost dezvoltat și implementat cu succes un sistem de detecție prin fibră optică pe distanțe mari ce folosește tehnica BOTDA. Construirea sistemului a presupus identificarea, dezvoltarea și asamblarea componentelor părților electronice, optice și mecanice din configurația acestuia, după cum a fost prezentat în detaliu în acest capitol.

Implementarea platformelor software în LabView atât pentru achiziția de date, cât și pentru procesarea acestora au fost, de asemenea, realizate cu succes și prezentate descriptiv în acest capitol.

Reglarea sistemului de detecție prin fibra optică pe distanțe mari (BOTDA) proaspăt implementat a fost realizată prin efectuarea unei serii de experimente preliminare. Imediat ce reglarea sistemului a fost efectuată a putut fi demonstrată funcționalitatea sistemului prin efectuarea unor experimente pentru detectarea variațiilor de temperatură, folosind 3 role de fibră optică unite, rola intermediară fiind scufundată într-o baie de apă, această configurație permițând controlarea temperaturii.

S-a demonstrat că fitarea polinomială de ordin superior propusă atinge o îmbunătățire de peste 40 de ori a timpului de calcul comparativ cu o metodă de fitare Gaussiană.

Pentru a demonstra performanța instrumentului, au fost prezentate primele măsurători ale temperaturii pe întreaga lungime a unei fibre de 24 km. Datele măsurate și procesate arată că sistemul poate măsura cantitativ o schimbare de temperatură aplicată la o distanță aproape 24 km, evidențiind astfel o incertitudine de frecvență de ~ 0.2 MHz, care corespunde unei rezoluții de temperatură de ~ 0.2 °C și unei rezoluții de deformare de 4 $\mu\epsilon$. Aceste performanțe, inclusiv rezoluția de 1m se mențin pentru fibre mai lungi de 100km.

5.4. Referințe

- [1] L. Thevenaz, "Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives," *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, pp. 13-21, 2010.
- [2] Corning, "Basic Principles of Fiber Optics, Corning Cable Systems," [Interactiv]. Available: www.corningcablesystems.com/web/college/fibertutorial.nsf/ofpara, 2015 12 Apr..

- [3] J. C. J. a. H. F. Taylor, "Distributed fiber optic intrusion sensor system for monitoring long perimeters," *Defense and Security*, pp. 692-703, 2005.
- [4] E. Udd, "Fiber optic sensors," 1993.
- [5] A. D.-L. A. L.-G. J. A.-C. S. M.-L. a. M. G.-H. X. Angulo-Vinuesa, "Rating the limitations and effectiveness of BOTDA range extension techniques," *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)*, vol. 4, pp. 96346R-96346R, 2015.
- [6] Y. Mao, "Distributed optical fibre sensing system based on Brillouin scattering," *The Hong Kong Polytechnic University*, 2014.

Capitolul 6

Realizarea unui sistem de detecție pe distanță mică (tehnica OFDR). Performanțe în laborator cu sistemul dezvoltat

6. 1. Introducere

În senzorii de fibră optică intrinseci ce folosesc tehnica de detecție distribuită, fibra optică în sine funcționează ca elementul senzorial. Structura unei fibre optice, în general, constă dintr-o formă cilindrică alungită, miez de SiO_2 dopat cu Ge cu un indice de refracție de aproximativ 1.54, înglobat într-o sticlă cu IR mai mic, acoperit cu straturi protectoare de plastic (Fig. 6. 1 a). Fig. 6. 1 b prezintă modul prin care un astfel de sistem simplu poate fi modelat să lucreze cu un mecanism de detecție distribuit [1, 2, 3].

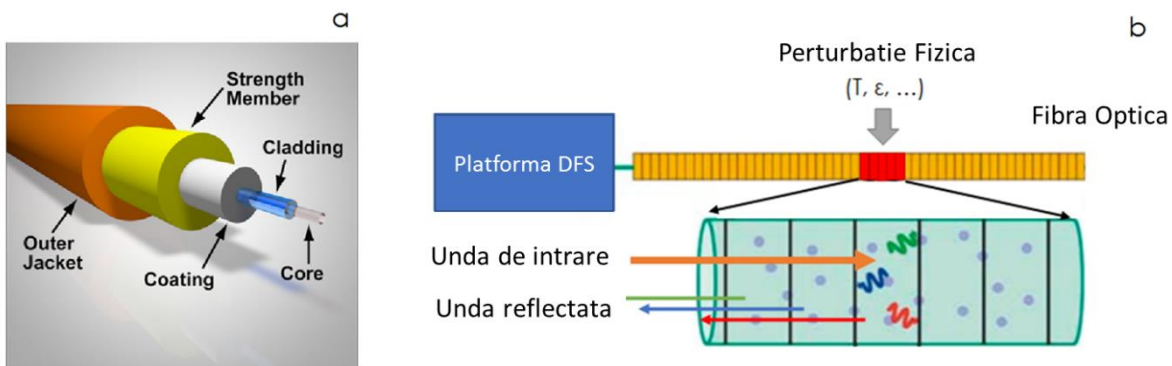


Fig. 6. 1 a). Geometria unei fibre optice, cu manta exterioară [4]. b). Principiul de funcționare al unui sistem generic DFS. O fibră poate fi modelată ca o secvență de secțiuni adiacente. O perturbatie fizică (de exemplu, schimbarea de temperatură, deformare, unda acustică etc.) schimbă starea locală a fibrei, astfel rezultând o modificare în unda de lumină reflectată

Atunci când are loc un anumit eveniment fizic într-una dintre aceste secțiuni de fibre imaginare, lumina este dispersată în secțiunea respectivă cu o frecvență, fază sau amplitudine ușor

perturbată. Lumina dispersată este detectată de către o platformă DFS (Distributed Fiber Sensing), care poate individualiza locul evenimentului în lungimea fibrei.

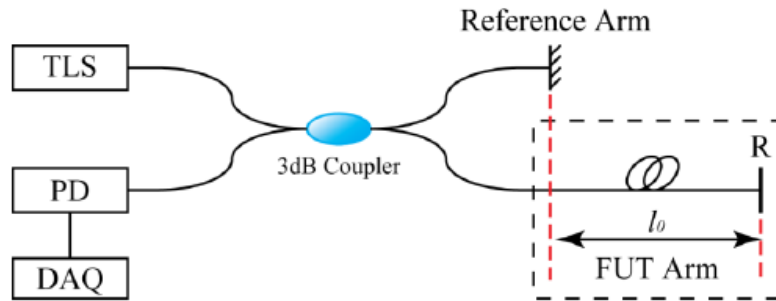


Fig. 6. 2 Schema unui sistem OFDR [5]

Beneficiile esențiale ale tehnologiei OFDR sunt modurile cvasi continue ale undei generate de laser și de detecția în bandă îngustă a semnalului optic retro împrăștiat, prin care este obținut un semnal semnificativ mai mare la raportul de zgomot în comparație cu tehnologia de impulsuri convenționale (OTDR sau BOTDA).

Configurația tehnicii OFDR necesită acces la doar unul dintre capetele fibrei optice, după cum se poate observa în imaginea din Fig. 6. 2 **Error! Reference source not found.** Acest lucru poate fi considerat ca fiind un avantaj prin comparație cu sistemele ce folosesc tehnica BOTDA, însă faptul că nu pot fi utilizate pe distanțe mari reprezintă o limitare.

6. 2. Implementare OFDR (detecție pe distanță mică)

Pentru a eficientiza procesul de implementare a sistemului de detecție pe distanță mică, realizarea ansamblelor și subansamblelor necesare acestuia au fost grupate în trei categorii principale:

- (1) Partea de optică și mecanică;
- (2) Partea de electronică;
- (3) Platforma software.

6.2.1. OFDR: Partea de optică și mecanică [6]

Această etapă presupune realizarea și implementarea atât a subansamblelor optice, cât și a celor mecanice, acestea fiind prezentate împreună deoarece nu poate fi realizată o divizare clară. Această schema optică a sistemului poate fi văzută în imaginea din Fig. 6. 3.

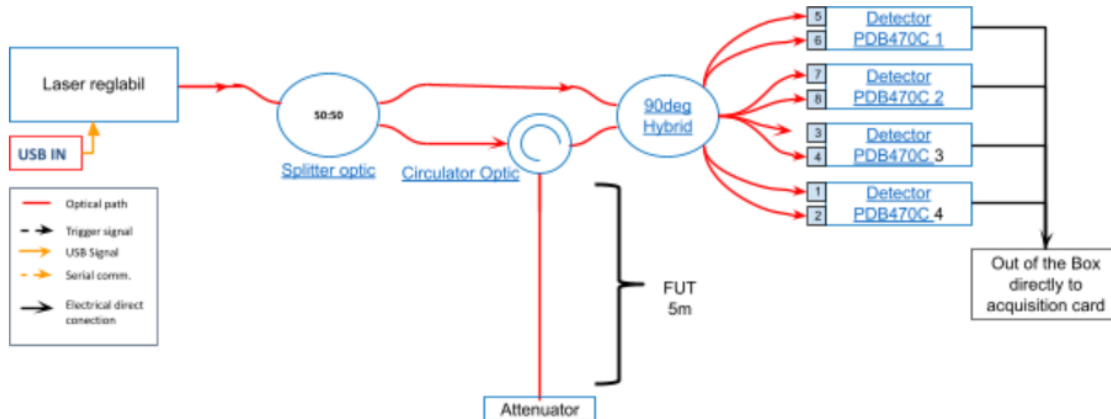


Fig. 6. 3 Montajul optic al sistemului de detecție pe distanță mică

După parcurgerea tuturor pașilor din acest capitol obținem o platformă de detecție pe distanță mică, după cum este prezentat în imaginile din Fig. 6. 4.



Fig. 6. 4 Rezultatul final al asamblării cutiei pentru platforma de detecție pe distanță mică (vedere de față și din spate cu capacul pus)

6.2.2. OFDR: Electronica

Din punct de vedere electronic, sistemul are o configurație, simplă formată din 2 trasee principale, după cum urmează:

1. Sursele de alimentare ale detectorilor balansați sunt cele originale, astfel fiecare trebuie conectat la 220V. Pentru a efectua acest lucru s-a decis realizarea unui montaj de tip bloc și s-a dezvoltat un panou general pentru alimentare, acesta fiind imprimat 3D.

2. Semnalele de la fiecare fotodetector balansat, după cum am precizat și la asamblarea mecanică, sunt trimise în placa de distribuție NI iar de aici cu cablul special NI în placa de achiziții NI PCIe 6376.

6.2.3. Platforma Software OFDR

Interfața software a sistemului permite utilizatorului un control deplin asupra întregii infrastructuri a platformei. Programul platformei de detecție pe distanță mică respectă diagrama de funcționare prezentată în Fig. 6. 5.

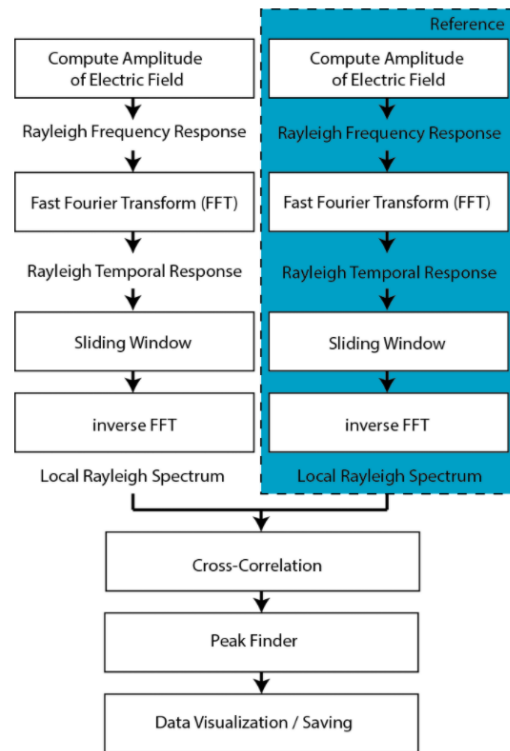


Fig. 6. 5 Diagrama de flux a procesării datelor pentru a extrage schimbarea de frecvență Rayleigh din ieșirea semnalelor fotodetector echilibrate

Interfața software astfel rezultată este una dinamică, compusă dintr-o serie de tab-uri după cum se poate observa în Fig. 6. 6. Această interfață permite utilizatorului să controleze toți parametri de achiziție a datelor ce vin din platforma de detecție

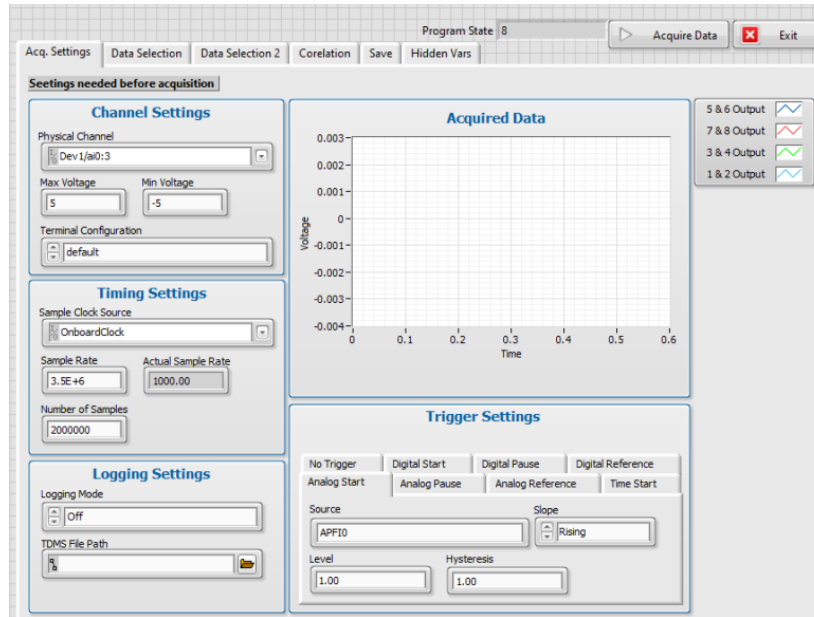


Fig. 6. 6 Interfața programului de achiziție de date

6. 3. Mass flow Monitoring – experiment [7], [8], [9]

Ca urmare a procesului de dezvoltare și implementare a sistemului de detecție pe distanțe mici, au apărut noi idei experimentale interesante, care implementate au condus ulterior la scrierea unui articol publicat într-o revistă științifică [7]. Pentru a realiza acest experiment a fost dezvoltat atât un sistem de testare automat, cât și o mică platformă software care să preia și proceseze/analizeze datele din timpul experimentului.

Experimentul vizează un obiectiv simplu, detectarea curgerii unui fluid printr-un tub cu ajutorul unei fibre optice montate în interiorul acestui tub, fiind prevăzută la exterior cu un încălzitor (Fig. 6. 7, Fig. 6. 8).

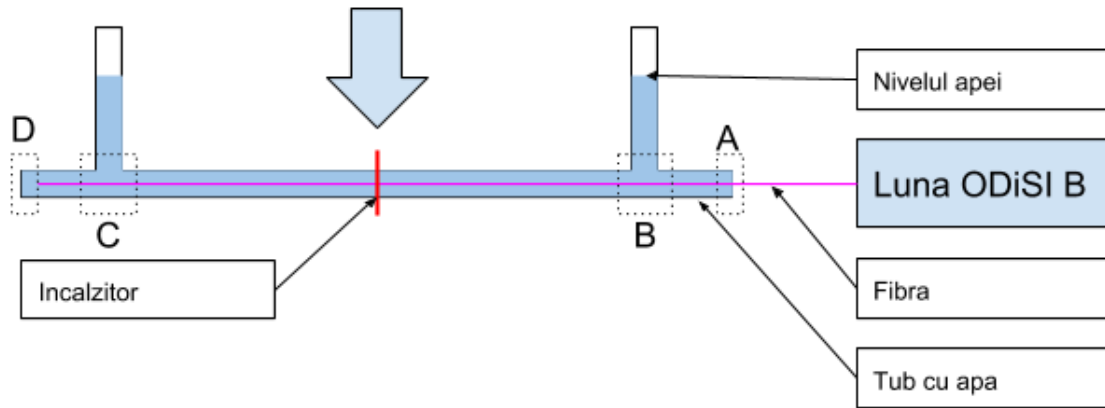


Fig. 6. 7 Schema de configurare și implementare a “fiber flower”

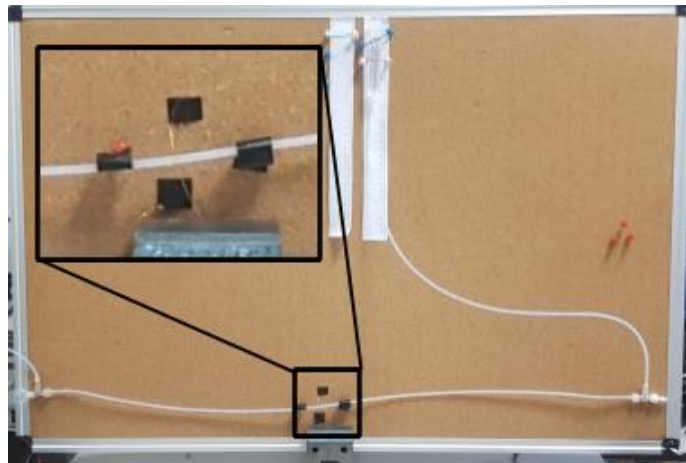


Fig. 6. 8 Reprezentare reală a montajului realizat

După cum se poate observa în Fig. 6. 9, am reușit să cream un model ce copiază fidel experimentul real. Am implementat o analiză a elementelor finite care rezolvă dinamica fluidelor împreună cu ecuațiile de transfer termic (acestea au fost implementate în Comsol Multiphysics).

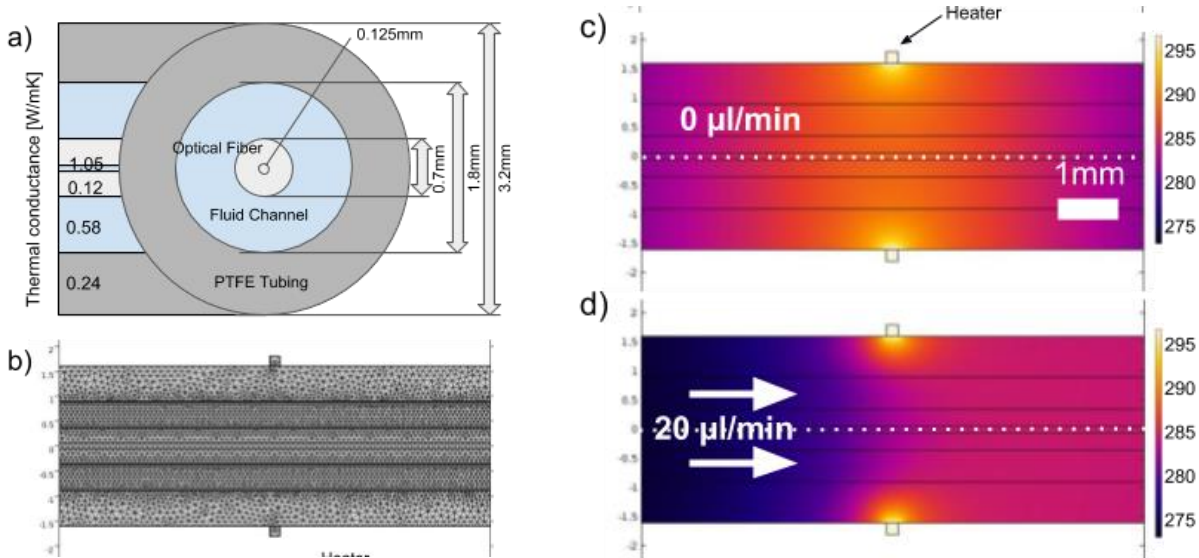


Fig. 6. 9 a) Secțiunea transversală a tubului fluidic cu fibră optică integrată ce prezintă dimensiunile și conductivități termice utilizate pentru analiza elementelor finite; b) secțiune transversală longitudinală a modelului care prezintă mărimea ochiurilor și profilul de viteză rezultat; c) distribuția temperaturii rezultată în absența debitului este simetrică și centrată în jurul locului încălzitorului; d) În prezența unui debit de 20μl/min, transportul de căldură prin convecție forțată schimbă profilul de temperatură în aval; Profilul de temperatură din fibră optică este luat la linia albă punctată așa cum este indicat

Distribuția căldurii este centrata în jurul elementului de încălzire pentru debitul zero (Fig. 6. 9 c) și se deplasează în aval cu viteze de curgere crescătoare și timp ($t = 235s$).

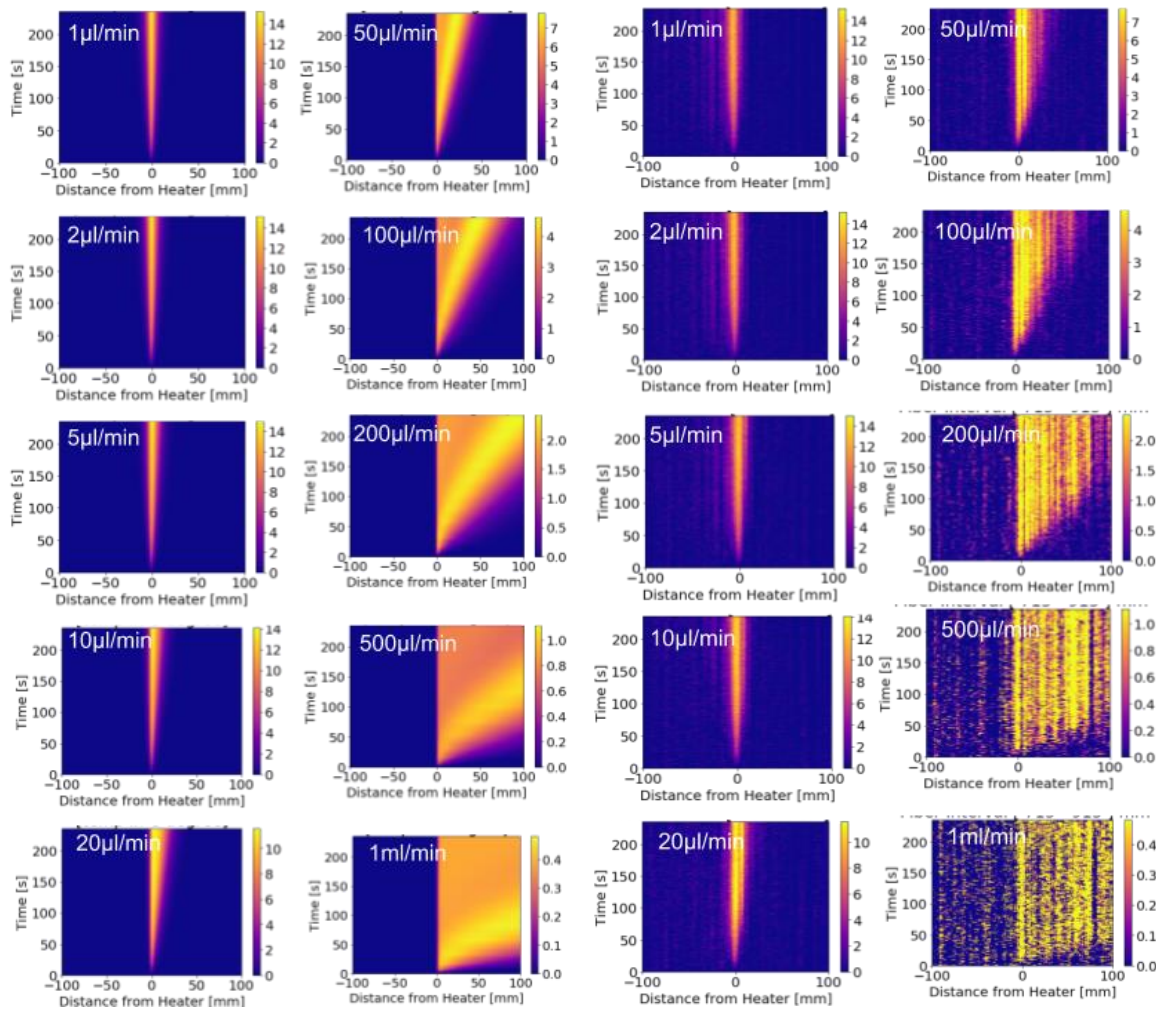


Fig. 6. 10 În partea stângă analiza elementelor finite iar în partea dreaptă rezultatele experimentale în ceea ce privește distribuția de căldură pentru primele 235 de secunde după pornirea încălzirii iar debitele variază de la 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ până la 1 ml/min .

După cum se poate observa în Fig. 6. 10, datele obținute în urma simulării se potrivesc perfect cu seturile de date obținute experimental. Ambele imagini utilizează aceeași scală de culoare, intervale de timp și de distanță, permițându-ne astfel o comparare facilă. Rezultatul experimental înregistrat într-o singură dimensiune de-a lungul fibrei este în concordanță cu analiza elementelor finite 2D care cuplează dinamica fluidelor cu ecuațiile de transfer de căldură.

6.3.3. Implementare Software

Pentru a putea realiza lucrurile toate lucrurile de mai sus, a fost dezvoltat un program în LabVIEW. În Fig. 6. 11 poate fi văzută interfața de lucru a programului dezvoltat.

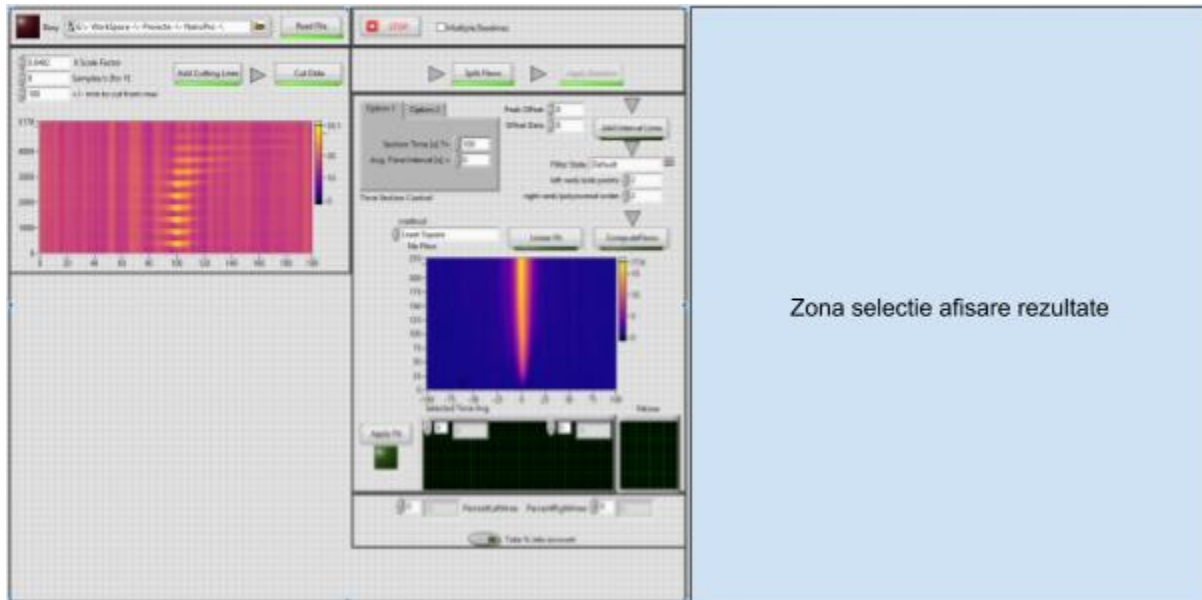


Fig. 6. 11 Imagine cu interfața cu utilizatorul

După cum se poate observa, programul dispune de o zonă dedicată ce oferă utilizatorului posibilitatea de a modifica rezultatele vizualizate. Zona respectivă este divizată în tab-uri, aceasta soluție fiind necesară pentru a permite vizualizarea unei game mari de informații, zona de afișare nefiind suficient de extinsă pentru toate acestea.

6. 4. Concluzii

6.4.1. Concluzii – mass flow monitoring

După cum am prezentat mai sus, am descoperit o nouă metodă de măsurare a debitului într-o conductă fluidică prin monitorizarea fluxului de căldură sub convecție forțată. Spre deosebire de multe alte tehnici de măsurare a debitului, această metodă bazată pe fibră optică nu are componente mobile, nu este intruzivă, funcționează în condiții dure, incluzând temperaturi ridicate, presiuni înalte, medii corozive și medii electromagnetice puternice.

Pentru prezentarea rezultatelor am rafinat câteva din cifrele prezentate anterior ce compară rezultatele elementelor finite cu datele experimentale. Comparând calitativ cele două informații

observăm o potrivire bună între simulare și rezultatele experimentale. Am cuantificat asimetria distribuției temperaturii în raport cu poziția încălzitorului. Am însumat separat temperaturile de supraîncălzire pentru toate punctele de date din amonte (l) și în aval (r) ale locației încălzitorului ($x = 0$ mm).

$$l = \sum_{x=-\infty}^0 T(x), r = \sum_{x>0}^{\infty} T(x), S = r + l,$$

unde $T(x)$ sunt temperaturile de supraîncălzire măsurate și S , suma tuturor temperaturilor de supraîncălzire înregistrate.

Fig. 6. 12 descrie temperaturile în amonte (l), în roșu, și în aval (r) în albastru față de trei ordine de mărime a debitelor. Ambele rezultate din simulare (stânga) și experimente (dreapta) arată datele obținute pentru momentele $t = 50, 100, 150$ și 200 s. Odată cu creșterea debitelor, vedem o creștere a căldurii care se deplasează din amonte spre locațiile din aval. În simulare, în cazul în care nici o căldură nu părăsește sistemul prin pierderi prin radiație, căldura se acumulează în timp, până când scade din fluxul convectiv din elementul observat (a se vedea debitele de $200 \mu\text{l}/\text{min}$ și mai mari).

În datele obținute din simulare, observăm o acumulare substanțial mai mare de căldură în aval decât în datele experimentale (curbele albastre). Această diferență poate fi explicată prin faptul că pierderile pentru mediul înconjurător nu sunt luate în considerare în simulare. Cu toate acestea, experimental există pierderi de căldură la aerul din jur, rezultând o temperatură de supraîncălzire mai scăzută.

Pentru a compensa pierderile de căldură, normalizăm ambele seturi de date împărțind l și r prin suma lor S (după cum se arată în Fig. 6. 12 b). Procentul de căldură transferat de la locațiile din amonte până la locațiile din aval este de 50% pentru condițiile de debit zero și atinge aproape 100% pentru $1000 \mu\text{l}/\text{min}$. Această măsură se dovedește a fi mult mai puțin independentă de timp în momentul în care au fost colectate punctele de date.

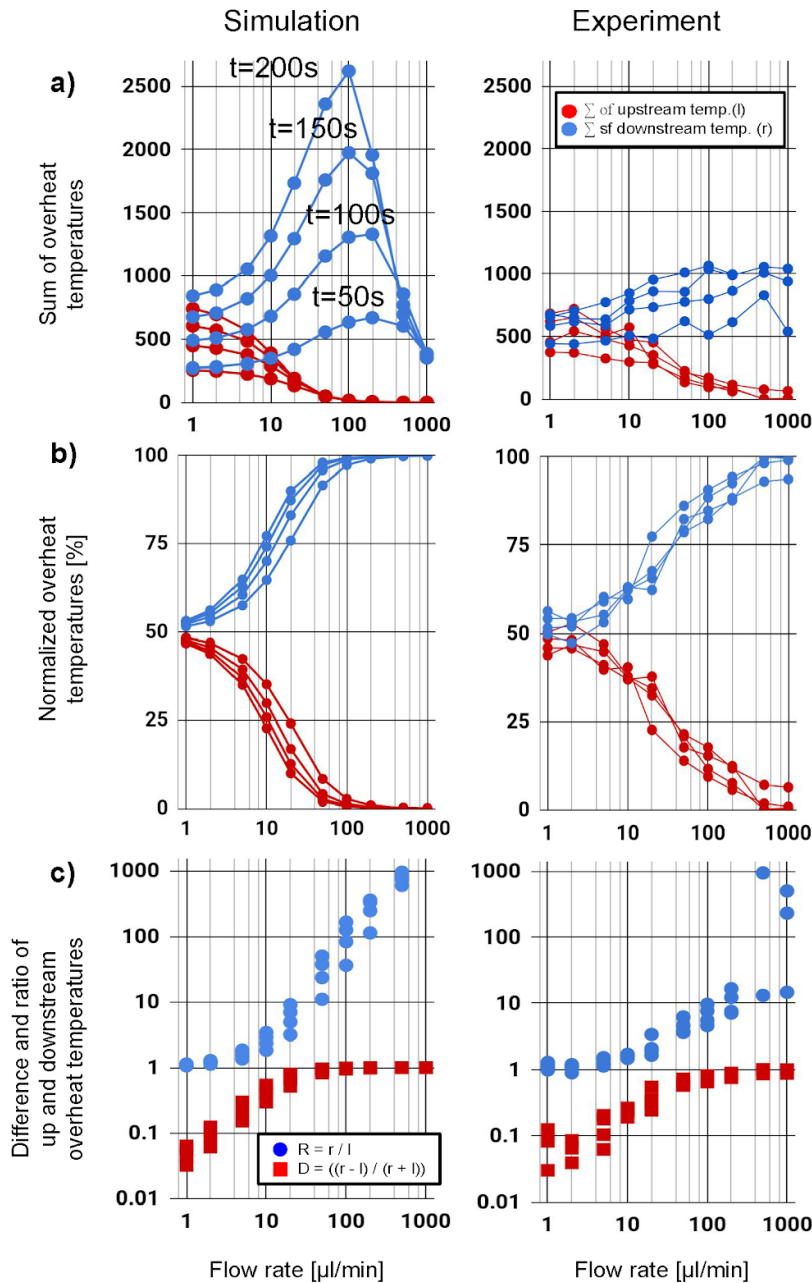


Fig. 6. 12 Compararea simulării FEA (stânga) și a rezultatelor experimentale (dreapta). a) Temperaturile de supraîncălzire pentru amonte (roșu) și în aval (albastru) sunt reprezentate grafic în raport cu debitul. Sunt afișate datele pentru timpul $t = 50, 100, 150$ și 200 s. b) Temperaturi normale de supraîncălzire c) Diferențial D (roșu) și raport R (albastru) de valori în amonte și în aval. În timp ce pentru debite mici ($< 10 \mu\text{l} / \text{min}$) diferența prezintă o metrică mai favorabilă, raportul (R în albastru) prezintă un răspuns mai bun pentru debitele mari ($> 10 \mu\text{l} / \text{min}$)

Am introdus în studiu o diferență de temperatură (D) între amonte și aval data de $D = (r - l)/s$ (pătratele roșii din Fig. 6. 12 c). D este independent de temperatura de supraîncălzire și crește monoton cu debitul. Pentru debitele de peste $10 \mu\text{l}/\text{min}$, semnalul diferențial se apropie asimptotic de 1. Acest lucru se datorează faptului că într-un regim dominat de convecție nu mai difuzează căldură în amonte și l se apropie de zero. D atinge 1 pentru condiția de non-flux în care doar difuzia contribuie la fluxul de căldură și $r = l$.

O a doua metrică este raportul (R) al l și r , $R = (r / l) - 1$. (punctele albastre din Fig. 6. 12 c). R este 1 pentru debitele zero și crește monoton cu debitele. În timp ce pentru regimurile cu debit scăzut ($< 10 \mu\text{l}/\text{min}$) în regimul dominat de difuzie diferența (D) este o metrică favorabilă, raportul (R) prezintă un răspuns mai bun pentru debite mari ($> 10 \mu\text{l}/\text{min}$) unde domină convecția. Cu excepția câtorva puncte de date pentru un debit foarte mic de $1 \mu\text{l}/\text{min}$ și debite foarte mari, ambele curbe prezintă o creștere monotonă cu debitele și, prin urmare, pot fi utilizate pentru detectare. Pe baza acestor rezultate, limitele inferioare de detectare sunt mai mici sau de $2 \mu\text{l}/\text{min}$ (mai exact de $32 \text{nl}/\text{min}$). O analiză detaliată a limitelor de detecție superioare și inferioare ale sistemului face parte din lucrările viitoare planificate. Aceste limite de detecție sunt legate de rezoluția laterală și termică a metodei de detectare a temperaturii optice a fibrelor. Limita de detecție scăzută combinată cu o gamă dinamică mare depășește multe alte tehnici de detecție a fluxului.

6.4.2. Concluzii - platforma OFDR

Au mai fost efectuate teste cu temperatura în baie de apă.

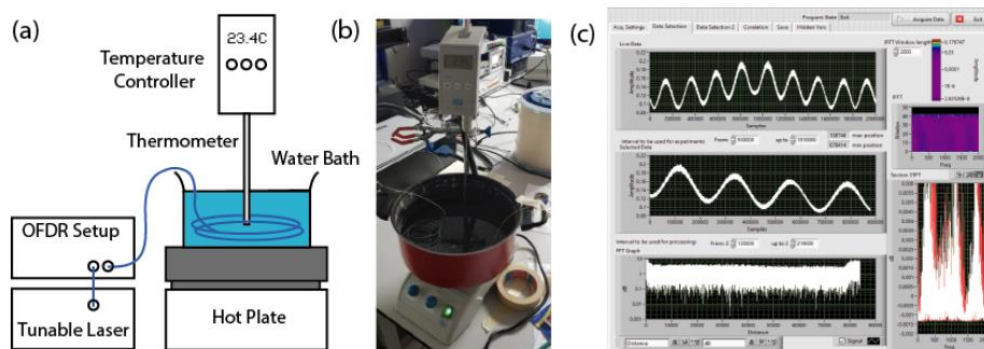


Fig. 6. 13 Configurare experimentală pentru detectarea temperaturii (a) schematică și (b) fotografie a configurării experimentale simple pentru detectarea temperaturii. c) platformă software pentru monitorizarea temperaturilor

În timp ce temperatura apei este crescută, datele măsurate prin configurarea OFDR sunt înregistrate folosind interfața dezvoltată de în LabVIEW. Folosind măsurarea la 25 °C ca referință, hărțile de corelație rezultate pentru 12 temperaturi diferite variază de la 25 °C la 37 °C. Așa cum era de așteptat, rezultă un vârf clar de corelație în care fibra nu a fost încălzită, de exemplu la o distanță de 150 cm, corelația spectrului măsurat Rayleigh cu el însuși la temp. de 25 °C. Acolo unde fibra este scufundată în apă (aproximativ de la 25 cm la 100 cm) temperatura crește, iar creșterea frecvenței Rayleigh a secțiunii de fibră optică scufundată crește, de asemenea.

Rezultatele arată că, pentru modificări mici de temperatură de până la câteva grade Celsius în raport cu referința, putem vedea o detecție clară a locației vârfului, rezultând un profil de temperatură măsurat de încredere (a se vedea, de exemplu, 30 °C și 35 °C); cu toate acestea, în general pentru schimbări de temperatură mai mari, detectarea vârfurilor și profilul de temperatură recuperat devine mai puțin precisă.

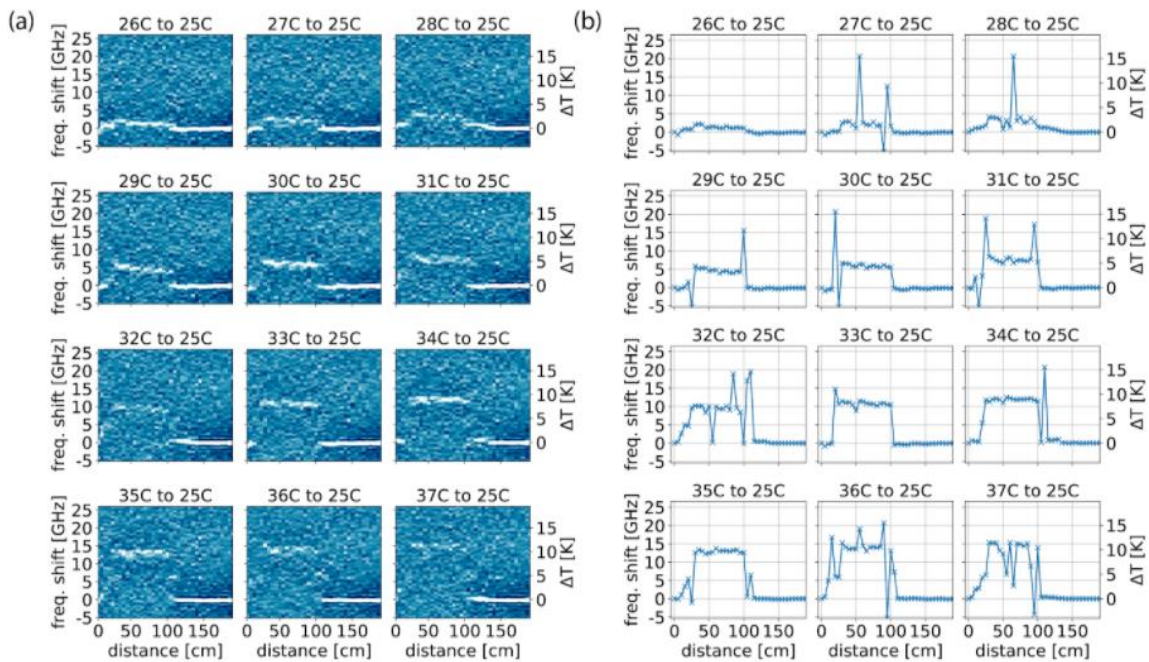


Fig. 6. 14 (a) Hărți de corelație diferențială distribuită preluate pentru 12 temperaturi cuprinse între 25 °C și 37 °C. (b) Profilurile de temperatură recuperate arată că detectarea vârfului de corelație devine nesigură cu diferențe mai mari de temperatură pe măsură ce amplitudinea corelației dispare

Pentru a măsura schimbări mari de temperatură, sau variații ale stresului echivalent mari, vârful de corelație poate fi obținut actualizând urmele de referință atunci când vârful de corelație se deplasează mai mult decât o valoare prag dată. Actualizarea referinței de fiecare dată când schimbarea frecvenței de corelație variază mai mult de 1.2 GHz (corespunzând aproximativ schimbării temperaturii de aproximativ 1K), hărțile de temperatură diferențială pentru cele 12 temperaturi prezentate anterior sunt recalculat și prezentate în Fig. 6. 15 a, în timp ce Fig. 6. 15 b ilustrează profilurile de temperatura diferențială rezultată. Rezultatele demonstrează o extracție mai fiabilă a profilului de temperatură, comparativ cu cazul raportat în Fig. 6. 14.

Cunoscând profilul de temperatură de referință și urmărind schimbarea de frecvență Rayleigh pentru fiecare dintre actualizările de referință, profilul distribuit al temperaturii absolute poate fi obținut așa cum este raportat în Fig. 6. 16 a. Rezoluția temperaturii este obținută prin deviația standard a profilului de temperatură la locația fibrelor care nu este afectată de modificările de temperatură, rezultând astfel o rezoluție de 0.1 K iar pentru stres o rezoluție sub $\mu\epsilon$; în timp ce rezoluția spațială este de 5 cm, fiind în acest caz limitată de rata de eșantionare spațială.

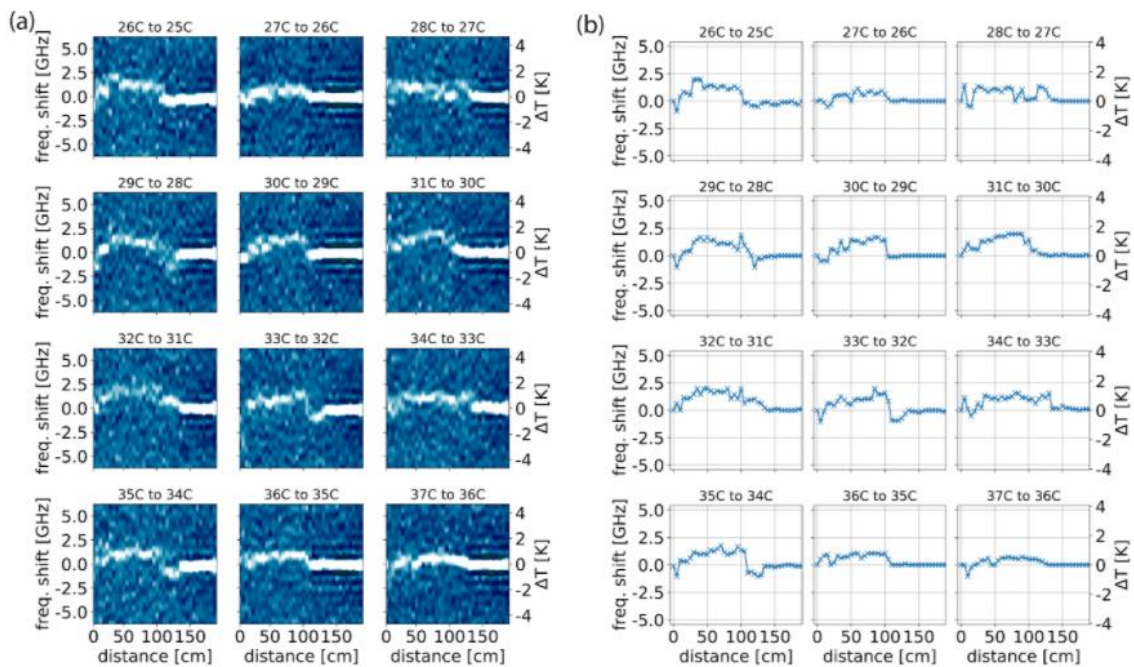


Fig. 6. 15 (a) Hărți distribuite ale temperaturii diferențiale pentru 12 temperaturi cuprinse între 25 °C și 36 °C, la corelarea fiecărui set de date cu precedentul. (b) Profiluri de temperatură diferențială recuperate

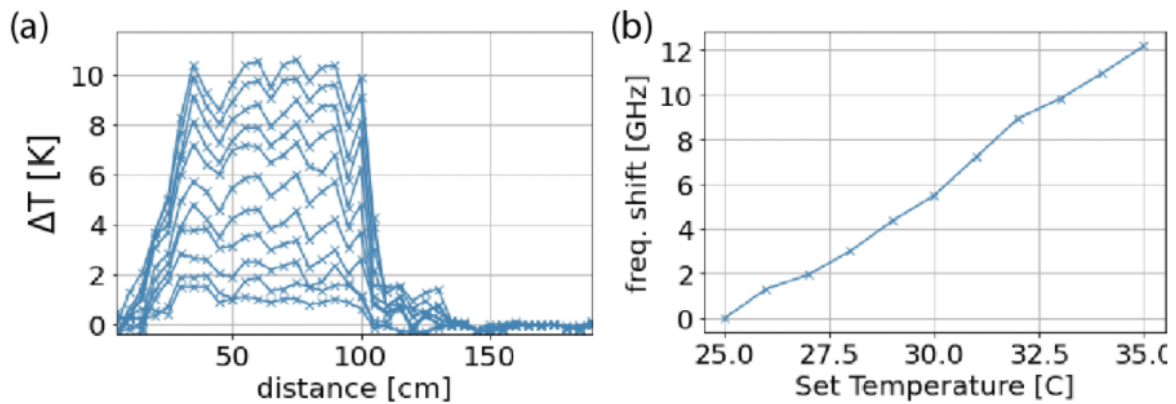


Fig. 6. 16 (a) Profilul distribuit al temperaturii de-a lungul fibrei de detectare obținut prin actualizarea continuă a urmelor de referință. (b) diagrama de dispersie a schimbării frecvenței față de temperaturile înregistrate cu un termometru. Observăm un răspuns liniar cu o sensibilitate de 1.2 GHz / K

În Fig. 6. 16 b arătăm media schimbărilor de frecvență găsite la 40 cm și 80 cm, unde fibra a fost complet scufundată în apă. Schimbările de frecvență sunt afișate în funcție de temperaturile măsurate efectiv folosind un termometru precis. Rezultatul arată o liniaritate bună, din montarea liniară observăm o sensibilitate de 1.2 GHz/K, care este așteptată și tipică pentru fibrele optice pe bază de silice.

6. 5. Referințe

- [1] L. Thevenaz, "Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives," *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, pp. 13-21, 2010.
- [2] Corning, "Basic Principles of Fiber Optics, Corning Cable Systems," [Interactiv]. Available: www.corningcablesystems.com/web/college/fibertutorial.nsf/ofpara., 2015 12 Apr..
- [3] J. C. J. a. H. F. Taylor, "Distributed fiber optic intrusion sensor system for monitoring long perimeters," *Defense and Security*, pp. 692-703, 2005.
- [4] M. W. V. M. P. M. Kivilcim Yuksel, "Optical frequency domain reflectometry: A review," in *11th International Conference on Transparent Optical Networks*, Ponta Delgada, Portugal, 2009.

- [5] J. Song, "Optical Frequency Domain Reflectometry: Sensing Range Extension and Enhanced Temperature Sensitivity.," *Université d'Ottawa/University of Ottawa*, 2014.
- [6] M. A. S. M. E. D. Z. Jderu Alin, "Realization of a polarization-insensitive optical frequency-domain reflectometer using an I/Q homodyne detection," vol. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications* , 2021, DOI:10.1186/s41476-021-00165-8.
- [7] M. E. D. Z. Alin Jderu, "Mass Flow Monitoring by Distributed Fiber Optical Temperature Sensing," *Sensors*, DOI:10.3390/s19194151, 2019.
- [8] M. A. S. M. E. D. Z. Jderu Alin, "Liquid Flow Meter by Fiber-Optic Sensing of Heat Propagation," *Sensors*, 2021, DOI:10.3390/s21020355.
- [9] D. Z. M. E. Jderu Alin, "Metoda si dispozitiv pentru monitorizarea calorimetrica a debitului sau fluxului de fluid or masa". Romania 2018.

Capitolul 7

Concluzii generale

7. 1. Microscopul de forțe atomice

În cadrul acestei teze de doctorat a fost efectuat cu succes un studiu detaliat asupra performanțelor tehnicilor și a sistemelor AFM existente la acest moment pe piață. Studiul a dus la definitivarea proiectării și a dezvoltării unui microscop cu forțe atomice cu multiple elemente de originalitate (cap de măsură cu un nou design, noi module electronice, platforma software nouă etc.) capabil să lucreze atât în mod contact la rezoluție atomică, cât și în mod non-contact cu o rezoluție verticală de 0.01 nm, capabil de imagistica pe arii reduse, dar și arii extinse (de până la aproximativ $50 \times 50 \mu\text{m}^2$), în multiple medii (condiții ambientale, în mediu cu umiditate controlată, în mediu de gaze inerte sau în vid până la 10^{-4} torr).

Tehnica și sistemul rezultat a fost testate experimental cu probe speciale de calibrare pentru astfel de dispozitive, cum ar fi TGZ02, grid ce are o treaptă pe z de 110nm, iar rezultatele sunt foarte bune, după cum se poate observa în Fig. 7. 1.

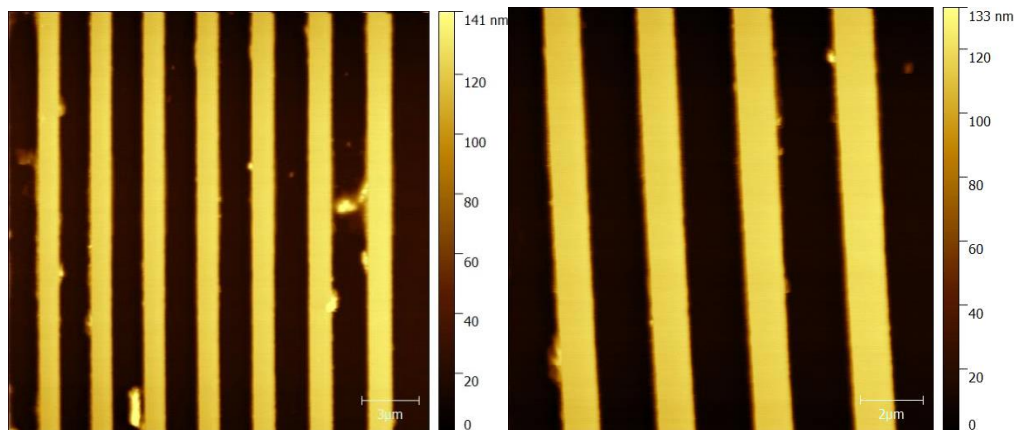


Fig. 7. 1 Imagine de topografie pentru grid-ul de calibrare TGZ02; În stânga profilul obținut pe suprafață mare iar în dreapta scanare pe suprafață restrânsă.

Performanțele reale ale sistemului sunt evidențiate însă în Fig. 7. 2 unde este demonstrată obținerea rezoluției atomice în condiții ambientale (temperatura camerei, umiditate RH 55%), pe o probă de mică proaspăt clivată.

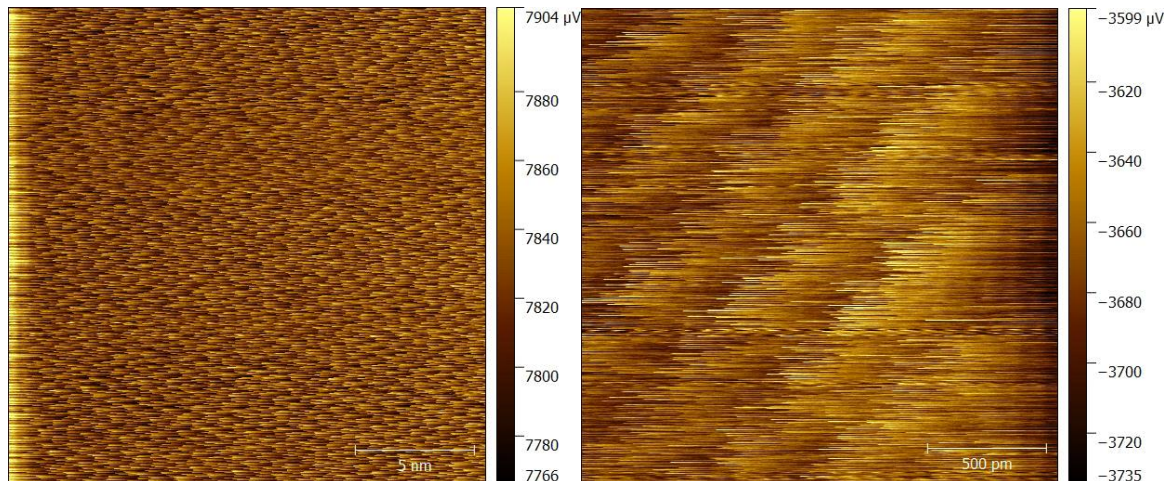


Fig. 7. 2 Rezoluția atomică obținută cu microscopul construit.

Faptul ca sistemul AFM construit este capabil de imagistică la rezoluție atomică demonstrează capacitatea acestuia de a atinge cele mai înalte rezoluții în toate modurile AFM uzuale, precum AFM topografie, AFM-conductive etc.

7. 2. BOTDA

Pentru a înțelege cât mai precis principiile de funcționare ale tehnicilor de detecție prin fibră optică pe distanță mare, dar și progresele realizate de cercetători și ingineri în dezvoltarea și optimizarea acestora, a fost realizat un studiu de cercetare ce a setat punctul de pornire pentru sistemul de detecție pe distanță mare.

Performanțele sistemului au fost demonstrate încă de la primele măsurători ale temperaturii pe întreaga lungime a unei fibre de 24 km. Datele măsurate și procesate arată că sistemul poate măsura cantitativ o schimbare de temperatură aplicată la o distanță de aproape 24 km, evidențiind astfel o incertitudine de frecvență de ~ 0.2 MHz, care corespunde unei rezoluții de temperatură de ~ 0.2 °C și unei rezoluții de deformare de $4 \mu\epsilon$.

După cum se poate observa, pe baza rezultatelor obținute și a performanțelor tehnicii BOTDA, sistemul poate astfel să detecteze schimbări de 0.2 °C sau de $4 \mu\epsilon$ pe o distanță mai mare de 100 km cu o rezoluție spațială de 1 m.

Un astfel de dispozitiv are o aplicabilitate importantă în multe domenii de activitate precum: industria petrolieră, monitorizarea clădirilor, a lacurilor, în industriile de foraj, precum și detecția intruziunilor (datorită sensibilității ridicate a fibrei se poate face diferența dintre vibrațiile produse de un om sau de o mașină, de exemplu).

În Fig. 7. 3 se poate observa cum o fibră optică, formată din 3 bobine de fibră prezintă 3 zone de temperatură diferite. Zona încadrată din această imagine corespunde cu bobina de fibră introdusă în apă caldă.

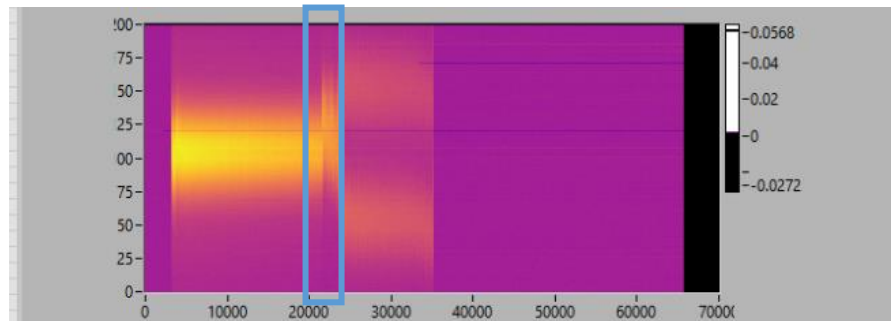


Fig. 7. 3 Imagine ce arată 3 bobine de fibră optică.

În același timp s-a demonstrat și faptul că fitarea polinomială de ordin superior propusă atinge o îmbunătățire de peste 40 de ori a timpului de calcul comparativ cu o metodă de fitare Gaussiană.

7. 3. OFDR

Studiul de cercetare efectuat pentru tehnicile și a sistemele de detecție pe distanță mică, în ceea ce privește principiile de funcționare ale acestora dar și progresele realizate la momentul actual a setat punctul de pornire pentru sistemul de detecție pe distanță mică.

Rezultatele obținute cu platforma OFDR Fig. 7. 4 arată că, pentru modificări mici de temperatură de până la câteva grade Celsius în raport cu referința, putem vedea o detecție clară a locației vârfului, rezultând un profil de temperatură măsurat de încredere (a se vedea, de exemplu, 30 și 35 °C); cu toate acestea, în general pentru schimbări de temperatură mai mari, detectarea vârfurilor și profilul de temperatură recuperat devine mai puțin precisă.

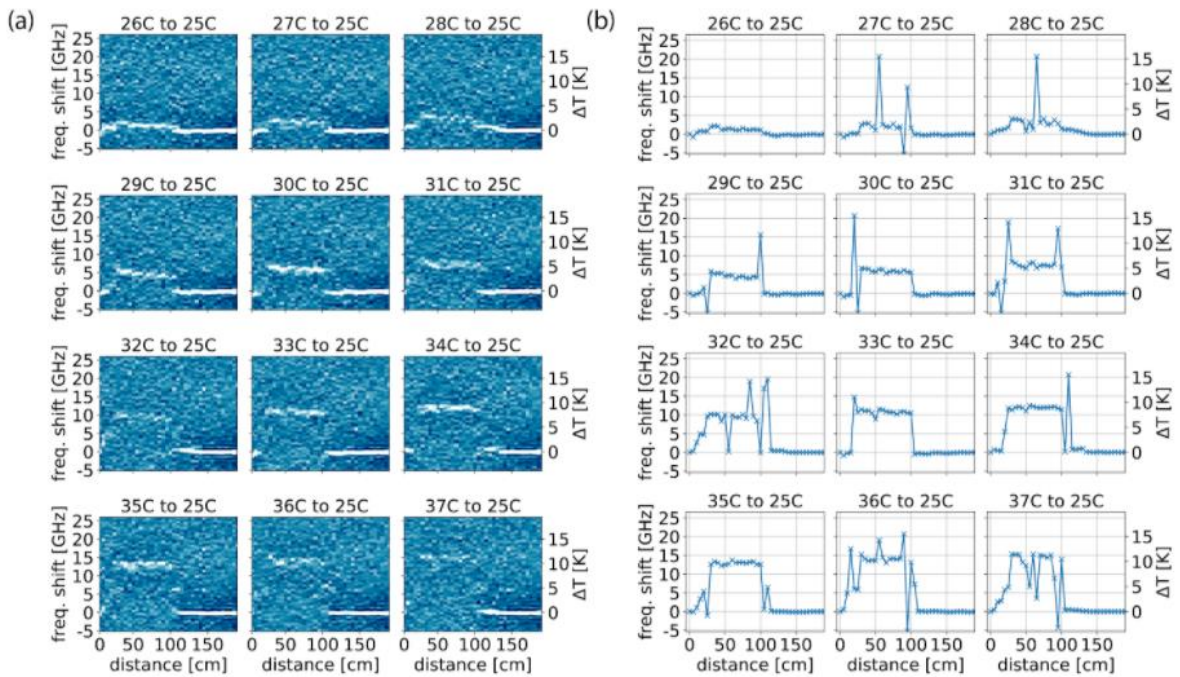


Fig. 7. 4 (a) Hărți de corelație diferențială distribuită preluate pentru 12 temperaturi cuprinse între 25 °C și 37 °C. (b) Profilurile de temperatură recuperate arată că detectarea vârfului de corelație devine nesigură cu diferențe mai mari de temperatură pe măsură ce amplitudinea corelației dispare

Pentru a măsura schimbări mari de temperatură, sau variații ale stresului echivalent mari, vârful de corelație poate fi obținut actualizând urmele de referință atunci când vârful de corelație se deplasează mai mult decât o valoare prag dată. Actualizarea referinței de fiecare dată când schimbarea frecvenței de corelație variază mai mult de 1.2 GHz (corespunzând aproximativ schimbării temperaturii de aproximativ 1K), hărțile de temperatură diferențială prezentate anterior sunt recalulate și prezentate în Fig. 7. 5.

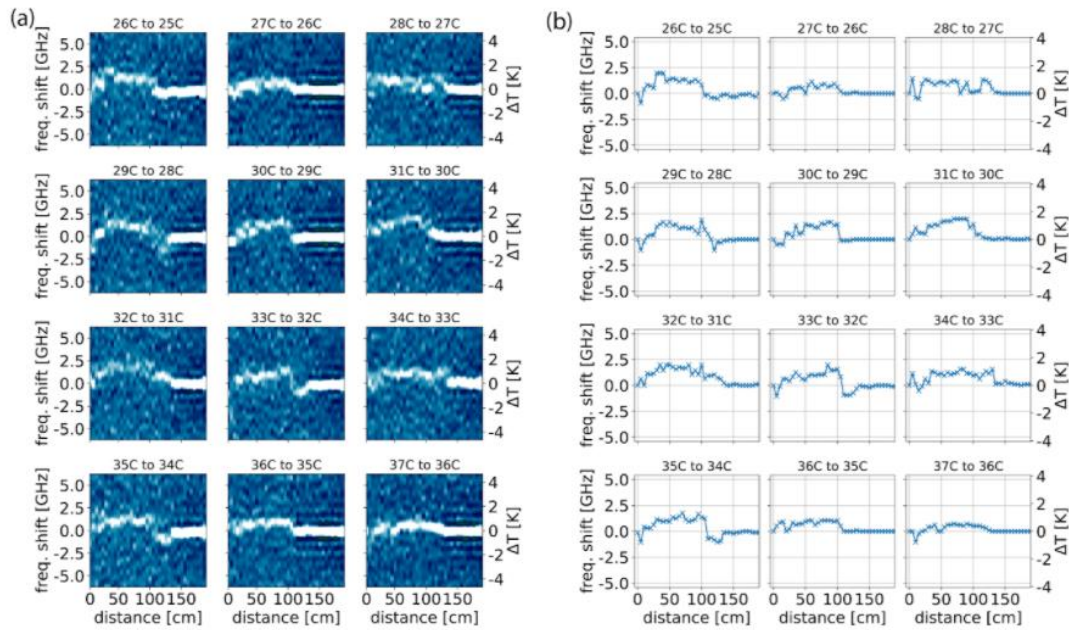


Fig. 7. 5 (a) Hărți distribuite ale temperaturii diferențiale pentru 12 temperaturi cuprinse între 25 °C și 36 °C, la corelarea fiecărui set de date cu precedentul. (b) Profiluri de temperatură diferențială recuperate

După cum se poate observa, pe baza rezultatelor obținute și a performanțelor tehnicii OFDR, sistemul poate astfel să detecteze schimbări sub ordinul °C sau deformare sub ordinul μe pe o distanță de câțiva metri cu o rezoluție sub micrometrică.

Un astfel de dispozitiv are o aplicabilitate importantă în multe domenii de activitate precum: industria medicală, industria de băuturi și alimente, industria semiconductorilor, monitorizarea apelor murdare dar și pentru măsurarea debitelor substanțelor periculoase sau extrem de corozive.

7. 4. Mass Flow Monitoring

După cum am prezentat în cadrul acestei teze de doctorat, am descoperit o nouă metodă de măsurare a debitului într-o conductă fluidică prin monitorizarea fluxului de căldură sub convecție forțată. Spre deosebire de multe alte tehnici de măsurare a debitului, această metodă bazată pe fibră optică nu are componente mobile, nu este intruzivă, funcționează în condiții dure, incluzând temperaturi ridicate, presiuni înalte, medii corozive și medii electromagnetice puternice.

Fig. 7. 6 descrie temperaturile în amonte (l), în roșu, și în aval (r) în albastru față de trei ordine de mărime a debitelor. Ambele rezultate din simulare (stânga) și experimente (dreapta)

arată datele obținute pentru momentele $t = 50, 100, 150$ și 200 s. Odată cu creșterea debitelor, vedem o creștere a căldurii care se deplasează din amonte spre locațiile din aval. În simulare, în cazul în care nici o căldură nu părăsește sistemul prin pierderi prin radiație, căldura se acumulează în timp, până când scade din fluxul convectiv din elementul observat (a se vedea debitele de $200 \mu\text{l}/\text{min}$ și mai mari).

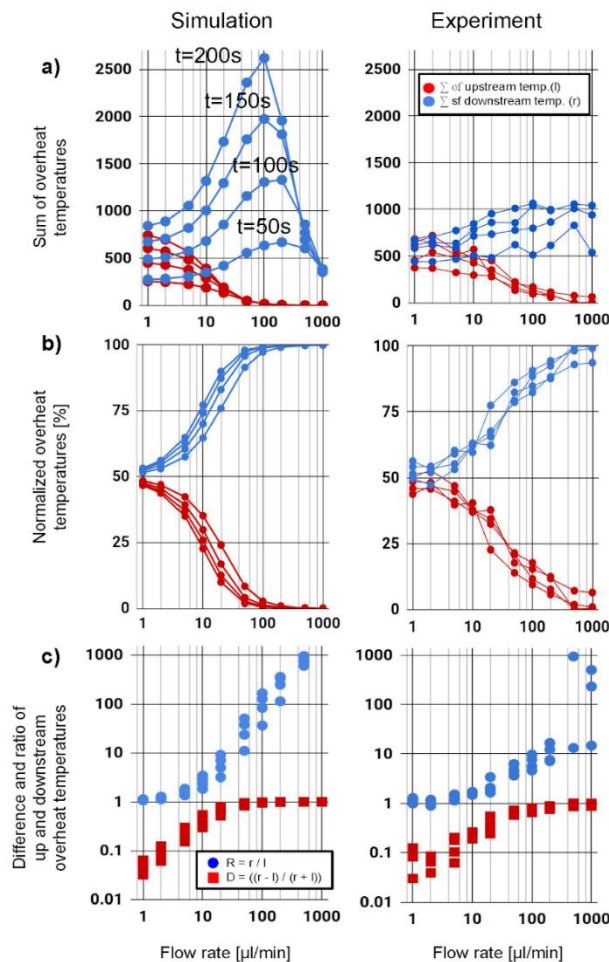


Fig. 7. 6 Compararea simulării FEA (stânga) și a rezultatelor experimentale (dreapta). a) Temperaturile de supraîncălzire pentru amonte (roșu) și în aval (albastru) sunt reprezentate grafic în raport cu debitul. Sunt afișate datele pentru timpul $t = 50, 100, 150$ și 200 s. b) Temperaturi normale de supraîncălzire c) Diferențial D (roșu) și raport R (albastru) de valori în amonte și în aval. În timp ce pentru debite mici ($< 10 \mu\text{l} / \text{min}$) diferența prezintă o metrică mai favorabilă, raportul (R în albastru) prezintă un răspuns mai bun pentru debitele mari ($> 10 \mu\text{l} / \text{min}$)

În datele obținute din simulare, observăm o acumulare substanțial mai mare de căldură în aval decât în datele experimentale (curbele albastre). Această diferență poate fi explicată

prin faptul că pierderile pentru mediul înconjurător nu sunt luate în considerare în simulare. Cu toate acestea, experimental există pierderi de căldură la aerul din jur, rezultând o temperatură de supraîncălzire mai scăzută.

Pentru a compensa pierderile de căldură, normalizăm ambele seturi de date împărțind I și r prin suma lor S (după cum se arată în Fig. 6. 51 b). Procentul de căldură transferat de la locațiile din amonte până la locațiile din aval este de 50% pentru condițiile de debit zero și atinge aproape 100% pentru 1000 $\mu\text{l}/\text{min}$. Această măsură se dovedește a fi mult mai puțin independentă de timp în momentul în care au fost colectate punctele de date.

După cum se poate observa, pe baza rezultatelor obținute și a performanțelor tehnicii OFDR implementată în această metodă de măsurare a debitelor, sistemul poate astfel să măsoare debite de la 32 nl/min până la 1000 $\mu\text{l}/\text{min}$ fără să necesite modificări sau reconfigurări.

Un astfel de dispozitiv are o aplicabilitate importantă în domeniul de activitate sensibile precum: industria medicală la livrarea de medicamente extrem de precis, dar și pentru măsurarea debitelor substanțelor periculoase sau extrem de corozive.

7. 5. Perspective de viitor

Rezultatele prezentate în această teză prezintă implementarea cu succes a unui microscop de forțe atomice pentru suprafețe mari și mici, dar și a două platforme de detecție a temperaturii și a stresului pe distanță mare, respectiv mică.

Deși tehnicile și dispozitivele sunt complete și perfect funcționale în acest moment, încă este loc de evoluție și îmbunătățire. De exemplu, pentru sistemul AFM, se pot dezvolta module software speciale pentru tehnici de scanare specifice, cum ar fi maparea conductivității probelor.

În ceea ce privește sistemele de detecție pe distanță mare, pentru acestea se pot dezvolta module de recunoaștere a tiparelor și astfel, utilizând abilitatea fibrelor de a detecta stresul, se pot face diferențe clare între vibrațiile făcute de un om, mașină sau alte surse. Astfel sistemul poate fi utilizat cu succes la detecțiile de intruziune utilizând un singur senzor.

Sistemele pe distanță mică în schimb beneficiază de precizia foarte ridicată și rezistența fibrelor optice, astfel acestea pot fi folosite cu succes la realizarea de seringi medicale extrem de precise sau pentru monitorizarea debitelor în zonele contaminate radioactiv sau acide.

După cum se poate observa, posibilitățile de evoluție din acest punct sunt extrem de mari și extinse pe multe arii.

Activități științifice

Rezultatele cercetărilor obținute în cadrul acestei teze de doctorat sau concretizate în următoarele publicații, conferințe și patente:

Articole Publicate:

1. M. A. Soto, **A. Jderu**, D. Dorobantu, M. Enachescu, D. Ziegler and S. Sedighi - „*Swelling-Based Distributed Chemical Sensing with Standard Acrylate Coated Optical Fibers*”, *Sensors*, 2021, DOI:10.3390/s21030718.
2. **A. Jderu**, D. Dorobantu, M. Enachescu, D. Ziegler, M. A. Soto - „*High-Order Polynomial Fitting Assistance for Fast Double-Peak Finding in Brillouin-Distributed Sensing*”, *Sensors*, vol. 21, 2020, <https://doi.org/10.3390/s21010187>.
3. C. C. Moise, A. Pantazi, G. V. Mihai, **A. Jderu**, M. Bercu, A. A. Messina, M. Enachescu - „*Surface Topography of Si/TiO₂ Stacked Layers on Silicon Substrate Deposited by KrF Excimer Laser Ablation*”, *COATINGS*, 11(11), 2021.
4. M. A. Soto, M. Enachescu, D. Ziegler, **A. Jderu** - „*Realization of a polarization-insensitive optical frequency-domain reflectometer using an I/Q homodyne detection*”, vol. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2021, DOI:10.1186/s41476-021-00165-8.
5. M. A. Soto, M. Enachescu, D. Ziegler, **A. Jderu** - „*Liquid Flow Meter by Fiber-Optic Sensing of Heat Propagation*”, *Sensors*, 2021, DOI:10.3390/s21020355.
6. D. Dorobantu, D. Ziegler, M. Enachescu, **A. Jderu** - „*Swelling-Based Chemical Sensing With Unmodified Optical Fibers*”, *Photonic Sensors*, 2021, DOI:10.1007/s13320-021-0637-2.
7. **A. Jderu**, M. Enachescu, D. Ziegler, D. Dorobantu - „*Fabrication of Optical Fibers with Multiple Coatings for Swelling-Based Chemical Sensing*”, *Micromachines*, 2021, DOI:10.3390/mi12080941.
8. M. Enachescu, D. Ziegler, **A. Jderu** - „*Mass Flow Monitoring by Distributed Fiber Optical Temperature Sensing*”, *Sensors*, DOI:10.3390/s19194151, 2019.

9. **A. Jderu**, D. Dorobantu, M. A. Soto, M. Enachescu, D. Ziegler - „*Brillouin Optical Time-Domain Analyzer engineered implementation using high-order polynomial spectral fitting*” – U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 85, Iss. 2, 2023 ISSN 2286-3540
10. J. Al-Zanganawee, S. Iftimie, A. Pantazi, R. Mesterca, **A. Jderu**, S. Antohe and M. Enachescu - „*On the physical properties of inverted photovoltaic structures based on P3OT:F-SWCNTs active layer*”, Journal of Ovonic Research, vol. 14, no. 4, pp. 287-292, 2018.
11. J. C. Grigore, **A. Jderu**, M. Enachescu - “*Vibrations And Equilibrium Motion Of The Planar Kinematic Chains With And Without Clearance In Joints*”, Ciencia e Tecnica Vitivinicola' Journal (ISSN: 0254-0223), Vol. 31, no 6, 0.425., 2016
12. J. C. Grigore, **A. Jderu**, M. Enachescu - “*Vibrations Of A Planar Kinematic Chains Formed By Straight Bars With Rotational Kinematical Links With Clearances*”, Ciencia e Tecnica Vitivinicola' Journal (ISSN: 0254-0223), Vol. 31, no 6, 0.425., 2016,
13. A. Barra, N. M. Ferreira, M. A. Martins, O. Lazar, A. Pantazi, **A. Jderu**, S. M. Neumayer, B. J. Rodriguez, M. Enachescu, P. Ferreira, C. Nunes, - „*Eco-friendly preparation of electrically conductive chitosan - reduced graphene oxide flexible bionanocomposites for food packaging and biological applications*”, COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY, 173, pag. 53-60, 2019.
14. O. V. Iaseniuc, M. S. Iovu, A. Ghiulnare, R. Mesterca, **A. Jderu**, M. Enachescu, - „*Micro-Raman spectra of bulk GexAsxSe1-2x chalcogenide glasses*”, PROCEEDINGS OF THE ROMANIAN ACADEMY SERIES A-MATHEMATICS PHYSICS TECHNICAL SCIENCES INFORMATION SCIENCE, 19(4), pag. 545-550, 2018.
15. O. V. Iaseniuc, M. S. Iovu, A. Ghiulnare, R. Mesterca, **A. Jderu**, M. Enachescu - „*Micro-Raman spectra of the amorphous GexAsxSe1-2x chalcogenide glasses*”, ADVANCED TOPICS IN OPTOELECTRONICS, MICROELECTRONICS, AND NANOTECHNOLOGIES IX, 10977, 2018.

Conferințe Științifice:

1. Aida Pantazi, Oana Brincoveanu, Antoniu Moldovan, **Alexandru-Alin Jderu**, Doru Dinescu, Marius Enachescu - „*Atomic resolution using a home-built atomic force microscope*”, Seminarul Național de nanoștiință și nanotehnologie, 2014, București, Romania

2. I. Popa, **A. Jderu**, C. Livede, D. Dorobantu, M. Enachescu - „*Distributed Brillouin Sensors for Simultaneous Temperature and Strain Sensing*”, Conference: ARA 40th Congress, The 40th ARA Proceeding, American Romanian Academy of Arts and Science, 2016, DOI:10.14510/40ARA2016.4015.
3. J. C. Grigore, **A. Jderu**, M. Enachescu - „*Application to the Motion and Equilibrium of the Planar Kinematic Chains with Rotational Links with Clearances*”, Conference: ARA 40th Congress, The 40th ARA Proceeding, American Romanian Academy of Arts and Science, 2016, ISBN: 978-1-4244-4715-2;
4. I. Popa, C. Livede, **A. Jderu**, M. Enachescu - „*A Digital Charge Amplifier Model for Hysteresis Reducing of Piezoelectric Actuators*”, Conference: the 39th American Romanian Academy of Arts and Sciences Congress, 2015. . ISBN: 978-1-4244-4715-2;
5. J. C. Grigore, **A. Jderu**, M. Enachescu - „*Matrix of Constraints for the Motion of the Planar Kinematic Chains with Rotational Links with Clearances*”, Conference: the 39th American Romanian Academy of Arts and Sciences Congress, 2015. . ISBN: 978-1-4244-4715-2;
6. G. Mihai, C. Moise, A. Pantazi, **A. Jderu**, O. Tutunaru, R. Mesterca, O. Lazar, A. Pumnea, D. Dorobantu, M. Enachescu - „*Optimization of PMMA Processing as a prerequisite for nanodevice building using Electron Beam Litography*”, International Conference CHIMIA 2018 „New Trends in Applied Chemistry” – Universitatea Ovidiu din Constanta, 24-26 Mai 2018, Constanta Romania (OP).
7. A. Pandazi, **A. Jderu**, R. Mesterca, G. Mihai, O. Lazar, S. Marin, O. Tutunaru, D. Dorobantu, A. Pumnea, M. Enachescu - „*Adhesive properties studies of f-SWCNTs based nanocomposite thin films*”, International Conference CHIMIA 2018 „New Trends in Applied Chemistry” – Universitatea Ovidiu din Constanta, 24-26 Mai 2018, Constanta, Romania (OP).
8. C. Moise, **A. Jderu**, A. Pantazi, R. Mesterca, D. Dorobantu, M. Enachescu - „*Innovative reactor for laser ablation synthesis of carbon nanomaterials*”, European Advanced Materials Congress, EAMC-2018, Stockholm, Sweden.
9. C. Moise, **A. Jderu**, A. Pantazi, R. Mesterca, D. Dorobantu, M. Enachescu - „*Three Carbon Nanomaterials Synthesized by KrF Laser Ablation in an Innovative Reactor*”, International conference CHIMIA 2018, NOMARES, Constanta, Romania.

10. **A. Jderu**, J. C. Grigore, F. Valeriu, G. Ionescu, M. Enachescu, D. Ziegler - „*Fluids flow measurement using Distributed Calorimetric Monitoring*”, "Mircea cel Batran" Naval Academy, 6th International Scientific Conference SEA-CONF 2020, 22-23 May 2020.
11. **A. Jderu**, D. Bojin, F. Valeriu, G. Ionescu, M. Enachescu, D. Ziegler - „*Distributed Fiber Optical temperature sensing used for mass flow monitoring*”, "Mircea cel Batran" Naval Academy, 6th International Scientific Conference SEA-CONF 2020, 22-23 May 2020.
12. **A. Jderu**, J. C. Grigore, I. Popa, D. Bojin, M. Enachescu, D. Ziegler - „*Brillouin Optical Time Domain Analysis technique implementation*”, "Mircea cel Batran" Naval Academy, 6th International Scientific Conference SEA-CONF 2020, 22-23 May 2020.
13. D. Dorobantu, **A. Jderu**, G. J. Cristian, G. Ionescu, M. Enachescu, D. Ziegler - „*Optical fibers used for chemical sensing*”, "Mircea cel Batran" Naval Academy, 6th International Scientific Conference SEA-CONF 2020, 22-23 May 2020.

Patente:

1. C. Livede, **A. Jderu**, M. Enachescu, I. Popa - „*Metodă și dispozitiv de liniarizare a mișcării actuatorilor piezoelectrice*”, RO131916 (A2) - 2017-05-30, RO20150000687 20150924, H01L41/09; H02N2/06.
2. I. Culeac, M. Enachescu, V. Borscirov, V. Verlan, I. Cojocar, M. Iovu, **A. Jderu**, D. Dorobantu - „*Sistem și procedeu de pază bazate pe tehnologia cu fibră optică, cu localizarea intervenției neautorizate în sistemul de pază*”, RO133682 (A2) - 2019-10-30, RO20180000807 20181017, G08B13/186, MD1308 (Y) - 2019-01-31, MD1308 (Z) - 2019-08-31.
3. **A. Jderu**, D. Ziegler, M. Enachescu - „*Metodă și dispozitiv pentru monitorizarea calorimetrică a debitului sau fluxului de fluid or masă*”, RO134255 (A2) - 2020-06-30, RO20180000823 20181022, G01B9/02; G01F1/66.
4. D. Dorobantu, **A. Jderu**, D. Ziegler, M. Enachescu - „*Metodă de măsurare și dispozitiv de tip senzor pentru detecția chimică cu ajutorul fibrelor optice*”. RO135770 (A2) - 2022-05-30, RO20200000744 20201118, G01B11/06; G01N21/77; G02B6/02.