

RAPORTARE STIINTIFICA

privind implementarea proiectului 95PED/2017 in perioada ianuarie-decembrie 2017

Proiect 95PED/2017: Metoda magneto-optica vectoriala de investigare a filmelor magnetice microstructurate (MicroMag)

Obiectivul Proiectului: Proiectul propune o metoda complexa de investigare a unor parametri magnetici de interes, atat in ceea ce priveste mediile de inregistrare magnetica cat si efectele de magneto-conductie in sisteme cu grosimi nanometrice si dimensiuni laterale micrometrice. Proiectul implica: (i) realizarea unui dispozitiv magneto-optic multifunctional combinand viteza, precizia si fiabilitatea in raport cu masuratorile magnetice localizate precum si posibilitatea de adaptare pentru procesul de productie al ariilor de senzori si (ii) implementarea software pe dispozitiv a unor algoritmi de investigare magnetica a filmelor nanometrice microstructurate .

Etapa 1: Proiectare modulara si interconectare complexa a sistemului integrat

Rezumat: Proiectul, bazat pe implementarea efectului Kerr magneto-optic in investigarea filmelor magnetice microstructurate, implica atat realizarea unui dispozitiv magneto-optic multifunctional cat si implementarea unor metodologii specifice de investigare magnetica. In aceasta etapa s-a avut in vedere proiectarea si realizarea unui model demonstrativ de dispozitiv optoelectronic de inalta precizie si sensibilitate pentru masurarea proprietatilor magnetice complexe ale unor componente micro-magnetice cu grosimi nanometrice. Au fost propuse solutii inovative vizand adaptarea unor noi configuratii de investigare magneto-optica prin focalizarea adecvata a luminii pe structuri micrometrice vizualizate optic si respectiv prin utilizarea unui suport de proba cu posibilitati de miscare de translatie si de rotatie. Avantajele sistemului magneto-optic propus si proiectat in cadrul acestei etape comparativ cu alte sisteme MOKE comerciale actuale rezida din: (i) combinatia de precizie, viteza si fiabilitate a masuratorilor locale (micrometrice), (ii) posibilitatea de adaptare pentru investigatii privind atat aspecte fundamentale cat si aplicative de magnetism si (iii) posibilitatea de adaptare pentru controlul procesului de productie al ariilor de senzori si actuatori magnetici integrati. In raportul de fata sunt prezentate etapele de proiectare, realizare si interconectare ale componentelor principale ale sistemului multifunctional precum si primele incercari de obtinere a sistemelor magnetice microstructurate pe care urmeaza sa se faca optimizari si analize vizand parametrii optici si magneto-optici ai sistemului proiectat.

Descrierea stiintifica si tehnica: In aceasta etapa s-au cautat solutii optime privind adaptarea de noi configuratii pentru observarea efectului Kerr magneto-optic in prezenta unui sistem de focalizare a radiatiei incidente si a unui sistem microscopic de urmarire a pozitiei fascicului incident si a sistemului complex de pozitionare a probei. Sistemul de pozitionare 3D al probei permite scanarea suprafetei acesteia cu rezolutie micrometrica iar prin mapare si memorarea caracteristicilor magneto-optice corespunzatoare punctelor scanate se poate obtine harta domeniilor magnetice de suprafata. Posibilitatile de rotire ale probei in raport cu campul aplicat permit functionalitatea de magnetometru vectorial, cu ajutorul caruia se intentioneaza a

fi obtinute informatii importante asupra directiilor de anizotropie si distributiilor unghiulare ale axelor de usoara magnetizare.

Ideea de baza a fost a unui sistem modular (pentru a fi ușor de înlocuit de componente alternative cu funcții si parametri adecvați), a carui schema de principiu este prezentata in figura 1, care sa poata fi dezvoltat permanent, atat in privinta aspectelor hardware cat si a celor software, depinzand de interesul particular al fiecarui utilizator. Sistemul conceput va fi complet automatizat si comandat de un calculator care sa pernita prelucrarea si stocarea convenabila a datelor (etapa urmatoare). Aplicația software care va fi implementata tot in etapele ulterioara, va fi deschisa pentru utilizator pentru introducerea de proceduri, metodologii si algoritmi proprii (cu excepția unui număr de algoritmi destinați obținerii celor mai importanți parametri magnetici/magneto-conducție, care vor fi deja implementați).

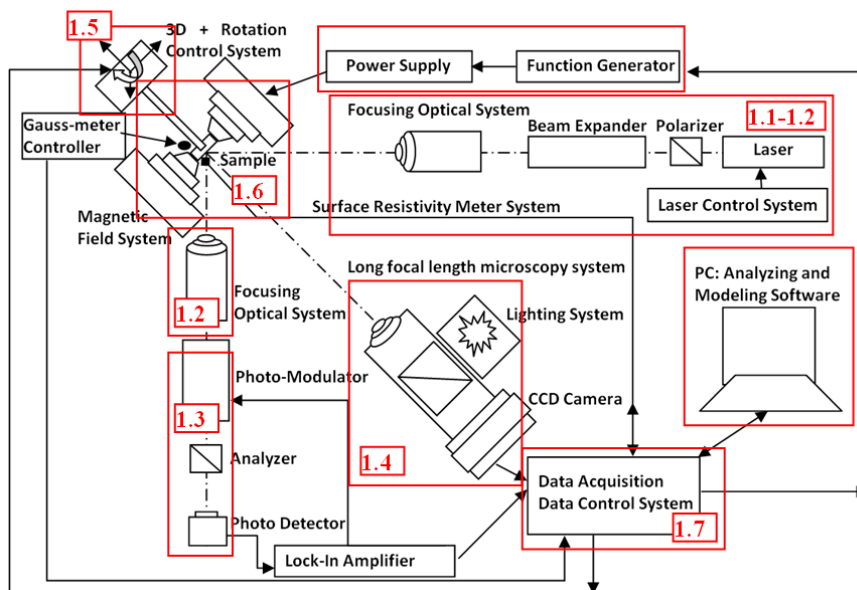


Fig. 1 Sistemul modular μ -MOKE vector magnetometru mulți-funcțional

Activitate 1.1: Proiectarea sistemului optic de focalizare. Design preliminar al sistemului integrat.

Microscoapele de domenii magnetice, al căror principiu este tot efectul Kerr, sunt adecvate in general gasirii intinderii domeniilor magnetice (cu rezoluții micrometrice) in filme relativ groase, implicând modificări mari ale unghiului Kerr. O combinație de MOKE focalizat cu posibilități de scanare a suprafeței sub o localizare microscopica a fascicului incident este foarte utila in detecția proceselor de magnetizare a micro-structurilor locale, chiar si in condiții in care acestea au grosimi nanometric. O caracteristica importanta a sistemului propus este aceea a observării domeniilor magnetice in filme subțiri si nano-fire, si ea se bazează pe capacitatea sistemului de a focaliza radiația optică incidenta la dimensiuni de ordinul micrometrilor. Această tehnica non – invazivă, are rezoluția spațială limitată doar de rezoluția optică (dimensiuni laterale ale fascicului focalizat de ordinul μm).

La proiectarea sistemului de focalizare s-a plecat de la premisa necesității folosirii unei surse de radiații monocromatice, bine polarizată și cu coerență relativ mare (laser He-Ne cu lungimea de unda de 633 nm sau dioda laser cu lungime de undă apropiată), pentru a putea controla atât focalizarea pe o arie cat mai mică a fascicului incident cât și o bună analiza a unghiului de rotire al planului de polarizare al radiației la reflexia pe structura magnetică (microstructura metalica cu grosimi nanometrice).

Inițial s-a luat in considerare analiza CAD (utilizând softuri specifice, OSLO si WinLens) privind focalizarea unui fascicul de raze paralele, cu o deschidere a aperturii de intrare de 15,75 mm pe o lentilă biconvexă, pentru a identifica scala specifică focalizării. In figura 2 sunt rezumate cateva date ale acestei analize.

*LENS DATA (Enter beam Radius **15**)

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE
-----	--------	-----------	-----------------	-------	-----

OBJ	--	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	50.000000	5.100000	15.750000 (A)	N-ZK7 C	(catalog Shot. n=1.508470)
2	-50.000000	--	15.750000	AIR	
3	--	50.000000	1.448549 (S)		
IMS	--	--	0.045556 (S)		

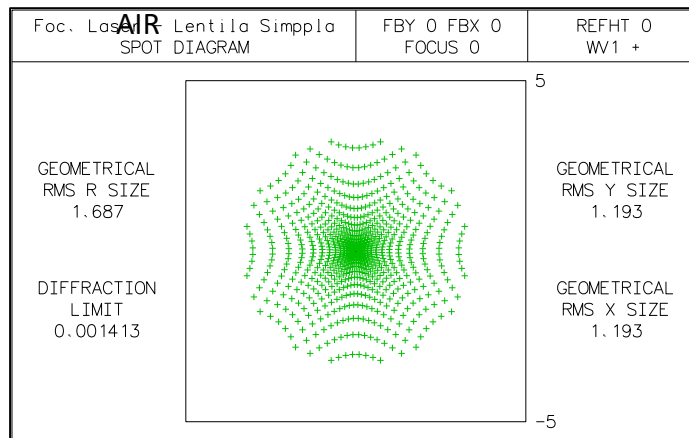
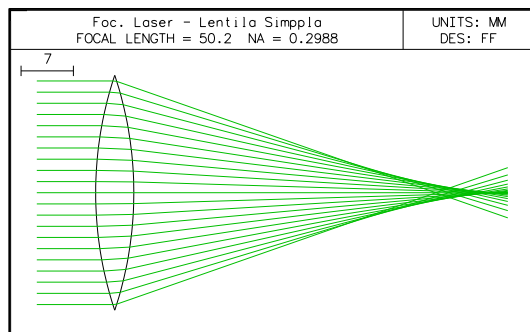


Fig. 2 Analiza CAD a densității de focalizare a razelor pentru lentila biconvexă

Presupunând limita fizică de difracție ("<https://www.newport.com/n/gaussian-beam-optics>"), talia minimă a unui fascicul gaussian emergent de pe sistemul de focalizare (dimensiunea de focalizare minimă) este dată de formula:

$$2w_0 = \left(\frac{4\lambda}{\pi}\right) \left(\frac{F}{D}\right)$$

unde λ este lungimea de undă a radiației folosite, F este distanța de focalizare a sistemului optic, iar D este apertura de intrare. De acești parametrii este legată și adâncimea de focalizare

$$DOF = \left(\frac{8\lambda}{\pi}\right) \left(\frac{F}{D}\right)^2$$

care reprezintă distanța pe axa optică între pozițiile la care talia fasciculului de focalizare este de $\sqrt{2}$ ori mai mare decât talia minimă. Se poate estima astfel limita fizică de care trebuie să ne apropiem cât mai mult prin soluțiile noastre tehnice (a se vedea tabelul de mai jos).

F; D (m)	$2w_0$ (m)	DOF (m)
F=30e-3; D=12e-3;	8.0571e-06	1.6114e-04
F=10e-3; D=12e-3;	6.7142e-07	1.1190e-006
F=50e-3; D=20e-3;	2.0143e-06	1.0071e-05

Tabelul 1 Limita de difracție pentru focalizare a unui fascicul având $\lambda = 632.8 \text{e-9 m}$

S-a observat ca pentru lentila biconvexă considerata, la o limită de difracție de $\sim 1.4 \mu\text{m}$ dimensiunea reală de focalizare este de $1400 \mu\text{m}$. Dacă reducem apertura de intrare la 1.5 mm dimensiunea de focalizare se reduce la $\sim 33 \mu\text{m}$ (cu o limita de difracție de $\sim 13.4 \mu\text{m}$), de asemenea insuficientă pentru scopurile noastre. Acest lucru poate fi compensat la proiectare fie prin utilizarea unor lentile asferice (de exemplu cele furnizate de "https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10649"),

la care producătorii asigură o dimensiunea reală de focalizare de $\sim 3 \mu\text{m}$, sau folosind sisteme clasice de dioptri (lentile compuse care să elimine aberațiile sistemului de focalizare). Un astfel de exemplu, la care s-a luat în considerare un sistem compus din trei lentile, este cel prezentat în figura 3.

*LENS DATA (Enter beam Radius 15)

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE
OBJ	--	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	64.28	6.23	15.75 (AF)	SK11	
2	-44.98	2.5	15.75 (F)	SF5	
3	-180.43	1.0	15.75 (F)	AIR	
4	35.2	6.0	15.75 (F)	SF8	
5	50.1	50.079	15.75 (F)	AIR	
6	0	0.021	0.1	AIR	
IMS	--	--	0.00083 (S)		

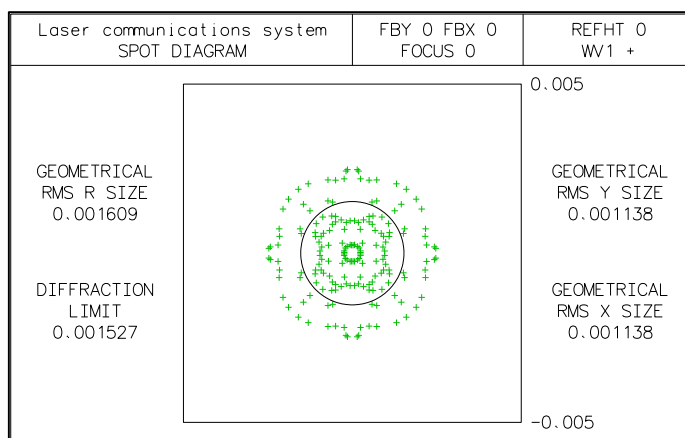
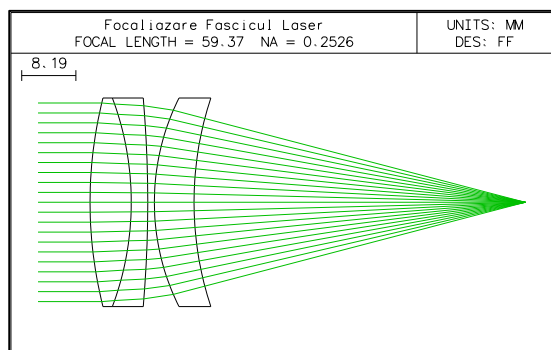


Fig. 3 Analiza CAD a densității de focalizare a razelor pentru sistem corectat de trei lentile

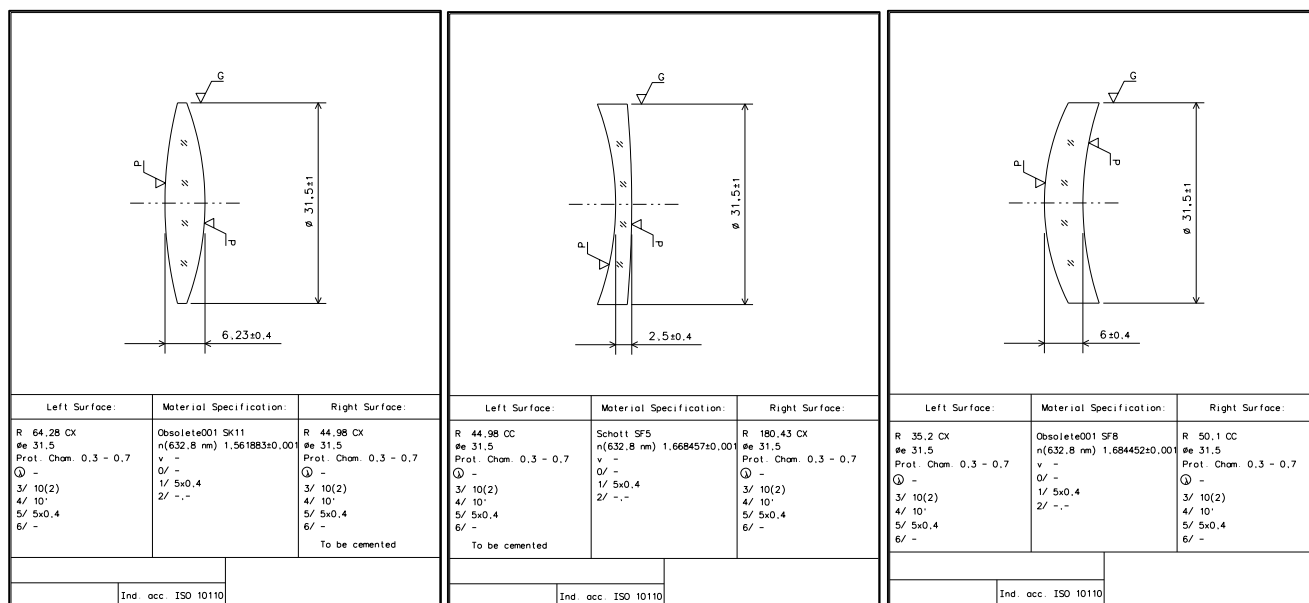


Fig. 4 Proiectarea sistemului de focalizare a razelor pentru sistem corectat de trei lentile.

Observăm de data acesta că pentru o apertură de intrare de aproximativ 15 mm, sistemul de focalizare corectat, la o limită de difracție de $\sim 1.5 \mu\text{m}$ poate asigura o dimensiunea reală de focalizare de $\sim 1.6 \mu\text{m}$, valoare care se găsește în limita scopurile noastre.

S-a luat de asemenea în considerare utilizarea unor perechi de obiective de microscop (focalizare/colectare) cu un grosiment important și distanță mare de lucru. De exemplu: 50X Mitutoyo Plan Apo SL Infinity Corrected Objective (<https://www.edmundoptics.com/microscopy/infinity-corrected-objectives/50x-mitutoyo-plan-apo-sl-infinity-corrected-objective/#specs>) sau 50X EO M Plan Apo ULWD Infinity Corrected (<https://www.edmundoptics.com/microscopy/infinity-corrected-objectives/50x-eo-m-plan-apo-ulwd-infinity-corrected/>), care au distanțele de lucru de până la 20.2 mm. S-a urmărit în principal obținerea unui grosiment mare care să poată fi folosit la focalizarea/captarea câmpului optic incident, respectiv reflectat de probă, pentru a asigura o arie de focalizare suficient de mică. Problema principală a unei astfel de soluții era combinarea unei mărituri mari a obiectivului de microscop cu o distanță de lucru suficientă pentru a permite simultan și analiza optică directă perpendiculară (prin microscopie) a probei, vezi figura 5.

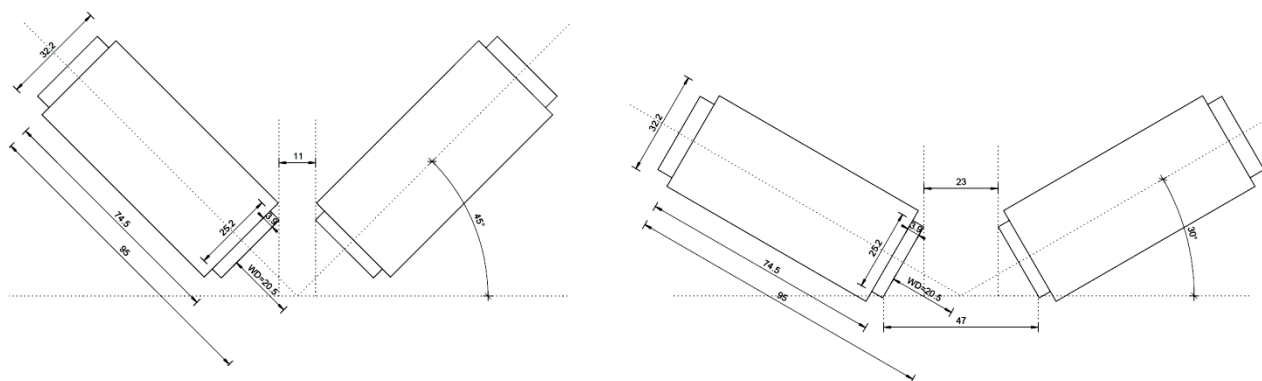


Fig. 5 Analiza spațiului liber lăsat de sistemul de focalizare/colectare format din două obiective de microscop cu distanța de lucru mare

Un impediment major al acestei soluții tehnice este însă legat de costurile acestor obiective de microscop, (între 3000 și 10000 de dolari).

Sistemul integrat a fost proiectat inițial plecând de la schema funcțională prezentată în figura 1. Observăm două drumuri optice, unul are drept sursă de lumină o diodă laser sau un laser He-Ne, polarizat, fasciculul de lumină fiind incident la 45 (sau 60) de grade pe proba magnetică, pentru a se maximiza lungimea drumului parcurs de fascicul prin structura analizată, în condițiile unei configurații adecvate pentru sistemul de generare a câmpului magnetic și respectiv pentru sistemul de microscopie. Focalizarea se realizează cu un sistem compus din expander/colimator, care face adaptarea de dimensiune dintre fasciculele furnizate de sursa de lumină și sistemul de focalizare pe proba (figurile 2 și 4). Pe același drum optic găsim apoi sistemul de captare a radiației luminoase reflectată de proba magnetică, din aria de focalizare/măsurare a probei, care a suferit rotația planului de polarizare proporțională cu câmpul magnetic local al probei, și colimarea ei la o dimensiune convenabilă sistemului de analiză a acestui unghi. Pentru dezvoltări viitoare, cum ar fi analiza proprietăților spectrale și magneto – optice, laserul poate fi înlocuit ușor cu un laser acordabil cu He-Ne (543nm, 594nm, 604nm, 612nm, și 633nm) sau cu o lampa cuplata la un monocromator, cu scopul henerării dependentelor de lungimi de

unda diferite. Celălalt drum optic, cel al sistemului microscopic de vizualizare directă a probei, va avea drept sursă o lampa cu vapori de mercur sau, gratie designului modular al sistemului, o dioda super-luminescenta, la incidenta normala, intr-un sistem microscopic cu reflexie, pentru observarea domeniilor magnetice.

Activitatea 1.2: Proiectarea finala si implementarea sistemului de generare a fascicului incident si a dispozitivului de colimare.

La realizarea sistemului optic de focalizare, cel mai important element este construcția unei lentile compuse care să permită obținerea unei funcții de împrăștiere a punctului, PSF, cât mai îngustă posibil. S-a ales inițial folosirea directă a fascicului laser, neexpandat, pentru obținerea unui montaj cât mai simplificat, și folosirea directivității bune date de sursele laser. Pentru analiza unui astfel de sistem de focalizare s-a folosit un softul OpTaliX si OSLO. S-a ales un sistem dublet cu separare de aer realizat din sticlă de tip LASF35 (catalog Schott).

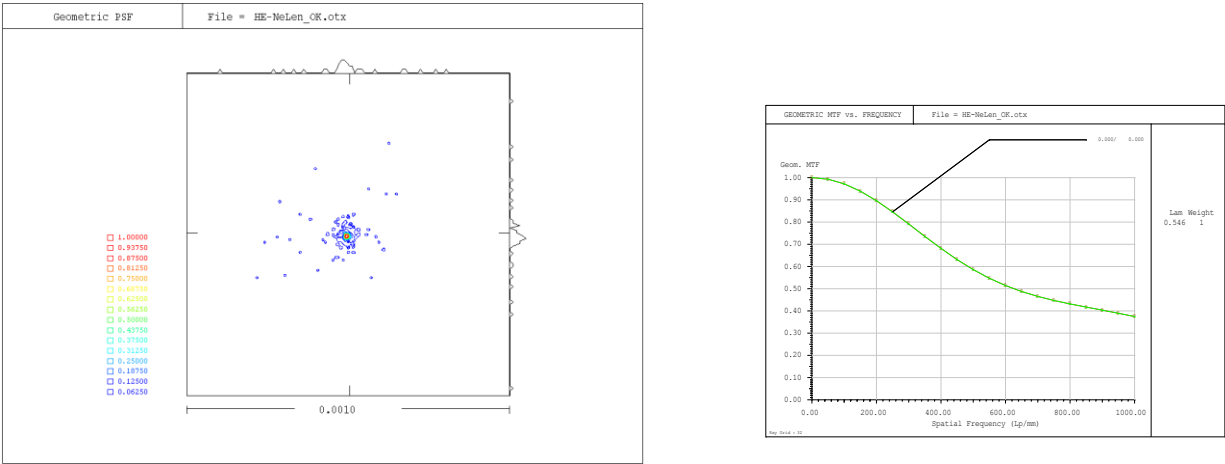
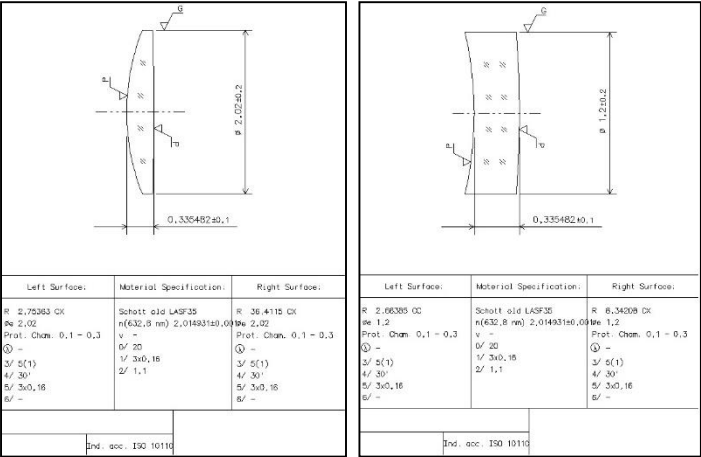


Fig. 6a Analiza distribuției de focalizare obținută de dublet, PSF geometric si MTF

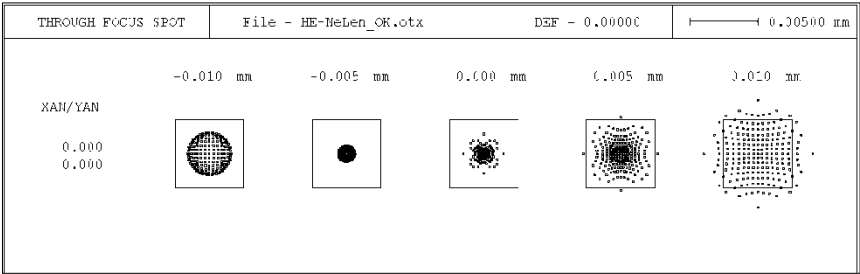


Fig. 6b Dimensiunile spotului focaliat la diferite distante față de planul focal

Se observă o foarte bună concentrare a energiei luminoase în centrul câmpului optic, semi-lărgimea fiind de aproximativ $1.55 \mu\text{m}$, o dimensiune foarte bună, aproximativ dublul lungimii de undă pentru care a fost proiectat sistemul. De asemenea se observă alura curată a curbei OTF, fără maxime secundare, prezentând o cădere uniformă pe domeniul spațial pe care îl ocupă. Această comportare optimă din punct de vedere al concentrării energiei luminoase într-un spot cât mai mic este confirmată și de distribuția funcției de transfer a modulației (MTF) prezentată în figura 6a. Se observă că o scădere la 0.5 a valorii acestei funcții are loc abia pentru frecvențe spațiale de ordinul a 600 mm^{-1} , ceea ce permite existența unor variații suficient de rapide ale distribuției de lumină în planul focal. Folosirea unei surse laser cu Ha-Ne are avantajul unei coerențe și stabilități foarte bune a fascicului luminos, dar are dezavantajul unui traseu optic rigid și întins spațial, limitând necesitatea de modularitate și minimizare a sistemului final.

Ca urmare a analizelor prezentate privind sistemul de focalizare a radiației optice, s-a ales achiziția unui dublet existent în comerț, și nu realizarea celorlalte sisteme de focalizare. Dubletul ales a fost ACA254-050-A (Air-Spaced Achromatic Doublet, AR Coating: 350-700 nm, $f=50 \text{ mm}$ WD 41.4mm de la Thorlabs, Inc.). Caracteristicile acestuia sunt date în figura 7.

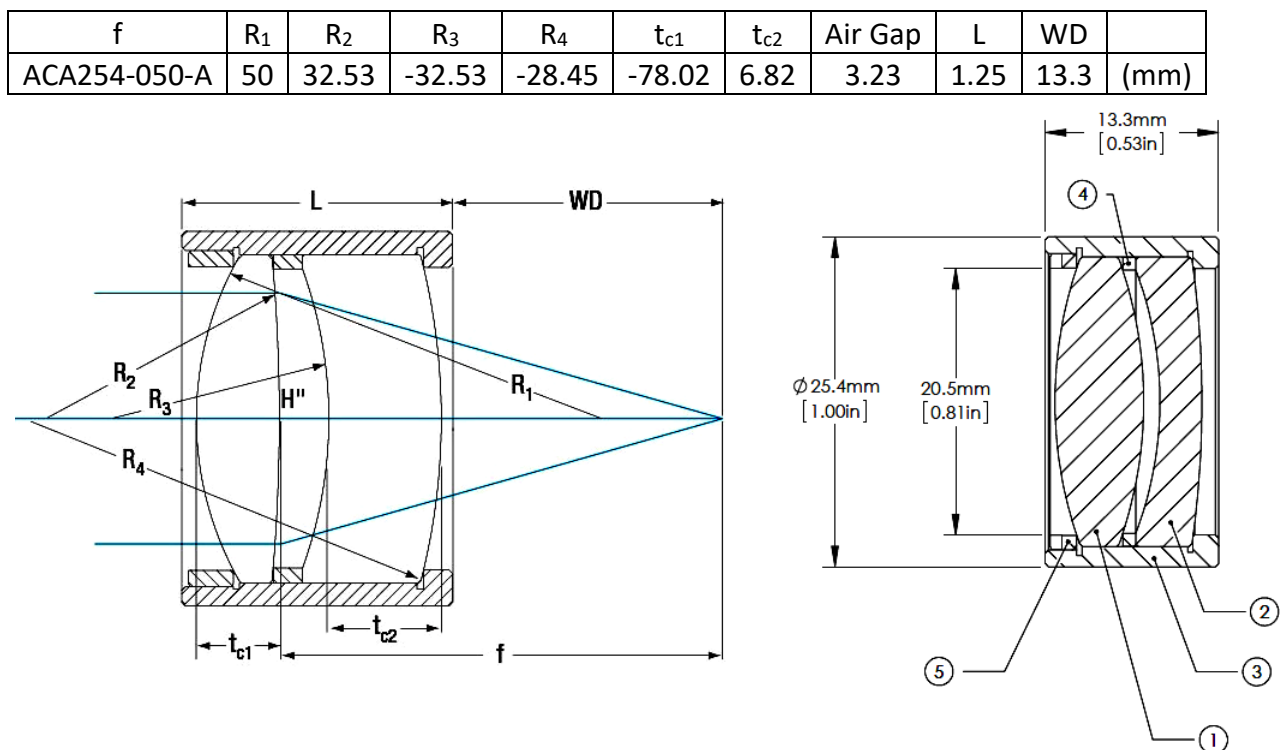


Fig. 7 Dubletul acromatic ales pentru focalizarea fascicului luminos pe probă

Pentru a asigura intrarea în dubletul de colimare a unei undă plane cu un front de undă cât mai uniform, s-a ales expandarea fascicului inițial de lumină cu un factor x5, fapt care asigură și o reducere corespunzătoare a divergenței inițiale a fascicului. A fost ales expandorul GBE05-A (5X Achromatic Galilean Beam Expander, AR Coated: 400 - 650 nm, de la Thorlabs, Inc.), vezi figura 8. Acesta asigură aberații scăzute fiind optimizat achromatic și asigurând o eroare a frontului mai mică de $\lambda/4$ (ceea ce implică o performanță ridicată privind limitata la difracție). Astfel, un fascicul extins poate fi focalizat pe o arie îngustă, talia tinzând până la limitata la difracție, aspect important pentru montajul nostru.

Lentilele sunt fabricată din sticlă N-BK7 și N-BASF2. Pentru a minimiza reflexiile la interfețele aer-sticlă, optica utilizată are o acoperire AR de bandă largă depuse pe ambele părți ale fiecărui obiectiv încorporat în piesă, în acest caz în domeniul 400-650 nm. Acoperirile AR reduc reflexia maximă pe suprafață la <0,5% față de intervalele de acoperire specificate, comparativ cu o reflectanță tipică de 4% pe suprafață pentru o optică neacoperită. Carcasa este proiectată astfel încât să nu se rotească la rotirea inelului de reglare a colimării, permițând utilizatorului să regleze divergența fără a perturba optica atașată și menținând stabilitatea de orientare.

	Mari re	Diametru de intrare	Coef. Reflexie Antireflex	Transmi sie	Nivel Distrugere
GBE0 5-A	5X	5.0 mm	RMax <0.5% for 400 - 650 nm	≥98% @ 633 nm	3 J/cm ² (532 nm, 10 Hz, 10 ns, Ø408 μm)

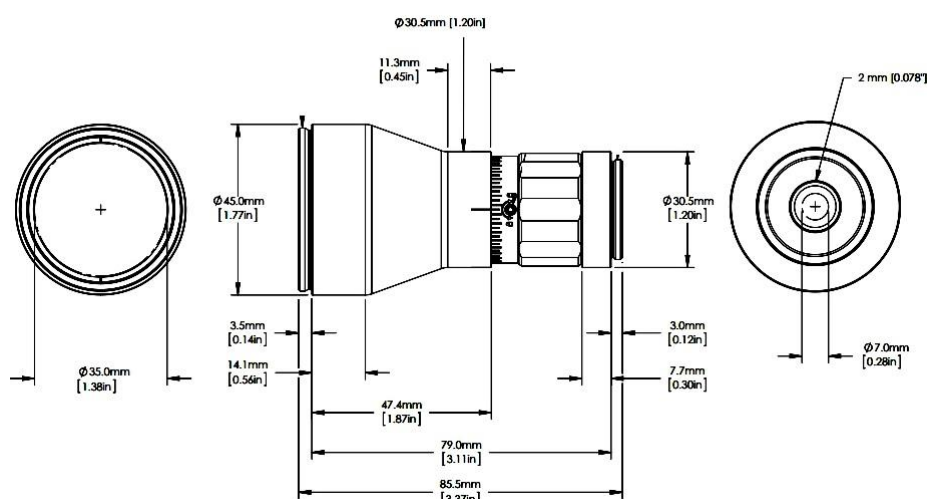


Fig. 8 Expandorul cu fascicul galilean acromatic, acoperit AR

Deoarece fasciculul incident pe proba magnetică trebuie să fie colimat, s-a ales un polarizor de câmp, LPVIS0 (50-MP2 Ø12.5 mm SM05-Mounted Linear Polarizer, 550 - 1500 nm). Aceste polarizatoare constau din nano-particule elipsoidice care au fost înglobate într-o sticlă de silicat de sodiu, ceea ce le oferă o performanță superioară în comparație cu polarizatoarele convenționale pe bază de polimeri. În timp ce polarizatorii convenționali și nanoparticulele absorb lumina polarizată perpendicular pe axa transmisiei, nanoparticulele au un prag de distrugere semnificativ mai mare și un raport de extincție mult mai bun. Caracteristicile acestui polarizor sunt sintetizate în tabelul de mai jos.

Extincția	> 100 000:1	Limita de distrugere	Grosimea	Apertură
LPUV050	530 - 640 nm	1 W/cm ² Continuous Block; 5 W/cm ² Continuous Pass	2.0 ± 0.2 mm	Ø11.86 mm

Pentru a asigura un montaj cât mai compact și sigur ca directivitate a axei optice și stabilitate în timp, pentru componentele optice de tip dublet colimator, polarizor de câmp și expandor de fascicul s-a ales utilizarea unui tub de montaj, de tipul SM1 (Slotted Lens Tube, 3" Thread Depth, with 2 Retaining Rings, Thorlabs). Aceste tuburi în care se pot monta dispozitive cu diametru Ø1" asigură un mijloc rapid și ușor

de a construi ansambluri optice compacte (Fig.9). Designul lor simplu și interfața directă cu orice componentă cu filet SM1 oferă flexibilitate pentru utilizarea diverselor montaje opto-mecanice.

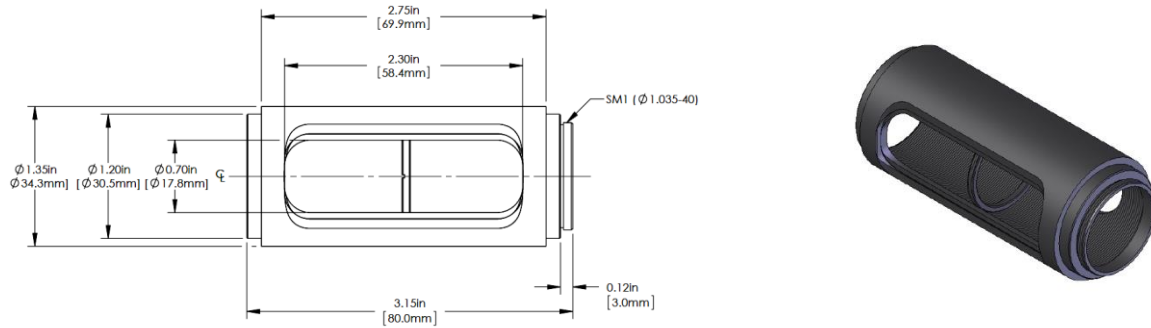


Fig. 9 Tubul de montaj și legatuă al componentelor optice

Ca sursă de lumină s-a ales dioda laser cuplată cu fibra optică (Thorlabs), care asigură atât o întreținere simplă, o stabilitate rezonabilă a intensității luminoase și o foarte bună împachetare a proiectării montajului final. Colimatorul F810FC (635 nm FC/PC Collimation Package, NA = 0.25, $f = 35.41$ mm) care cuplează fibra optică de la sursa laser cu restul montajului este pre-aliniat pentru a colima un fascicul laser care se propagă din capătul unei fibre conectate cu SMA având ca performanță limitată de difracție la lungimea de undă a sistemului. Colimatoarele de acest tip nu au parte mobilă, sunt compacte și nu sunt susceptibile la alinierea necorespunzătoare. Datorită aberației cromatice, lungimea focală efectivă (EFL) a lentilei duble este dependentă de lungimea de undă. Ca rezultat, aceste colimatoare vor funcționa optim numai la lungimea de undă proiectată. Obiectivul dublet este aliniat din fabrică astfel încât să fie o distanță de distanță față de vârful fibrei atunci când este introdus în colimator. Această distanță este egală cu lungimea focală a obiectivului asferic la lungimea de undă de proiectare. În plus, lentila dubletă are o acoperire AR care minimizează reflexiile de suprafață. În figura 10 sunt prezentate caracteristicile acestui colimator.

	Lungime de Unda	Antireflex	D^c (mm)	θ^d (deg)	NA Lens	f (mm)
F810FC-635	635 nm	350-700 nm	6.7	0.007°	0.25	35.41

Damage Threshold: 7.5 J/cm² (1064 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.442 mm)

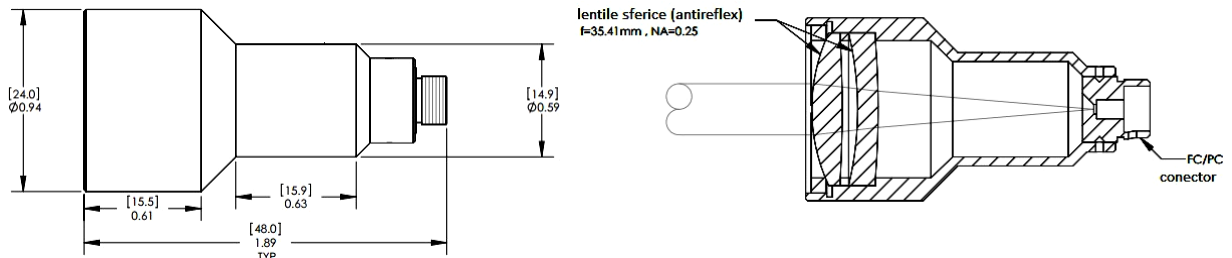
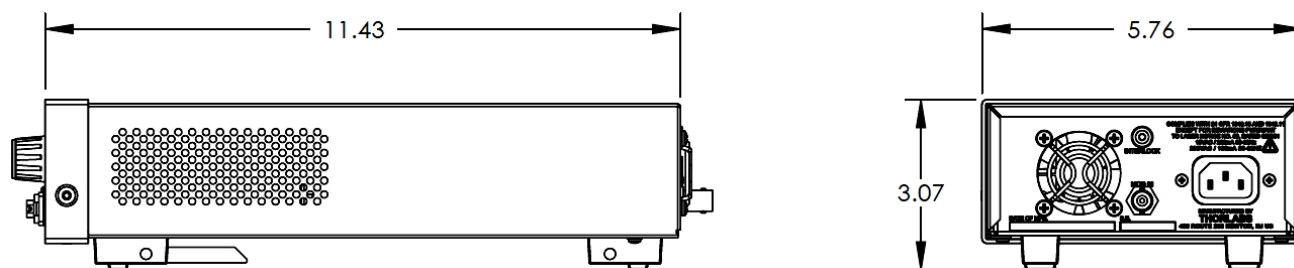


Fig. 10 Colimatorul de cuplaj cu fibra optică

Sursa de lumină aleasă este un sistem diodă laser Fabry-Perot la 635 nm având 2.5 mW, anume S1FC635PM (PM Fiber, FC/PC), vezi figura 11.

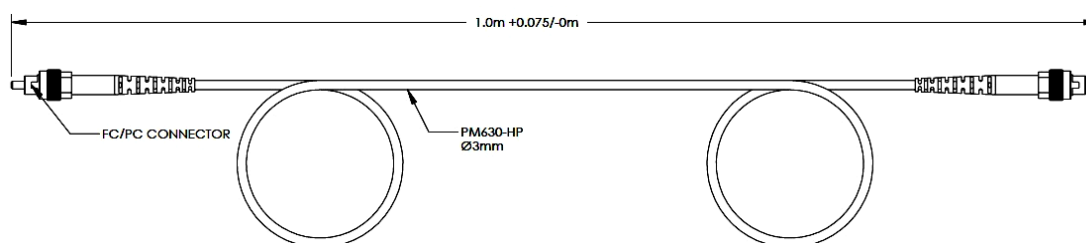


Tipul Fibrei	PM
Lungimea de unda	635 nm
Putere de iesire	2.5 mW (Min)
Stabilitate in putere	15 min: ± 0.05 dB, 24 hr: ± 0.1 dB (After 1 hr Warm-up at 25 ± 10 °C Ambient)

Fig. 11 Sursa și dioda laser monomod

Această sursă de laser cu fibră optică monomod cuprinde atât o diodă laser cu cavitare Fabry-Perot cât și un controler de curent într-o singură unitate de lucru. Dioda laser Fabry-Perot este conectată la o fibră cu un singur mod care este terminată la un compartiment FC/PC atașat la panoul frontal al unității. Pentru a reduce zgomotul din reflecțiile înapoi, se utilizează un cablu hibrid FC/ =PC-FC/APC cu capătul FC/PC conectat la sursa laser. Pe panoul frontal se găsește un afișaj care arată puterea de ieșire în mW, o tastă pornit / oprit, un buton de activare și un buton pentru reglarea puterii laserului. Panoul din spate include o intrare care permite ca curentul de antrenare a diodelor laser să fie comandat printr-o sursă externă de tensiune DC sau sinusoidală și o intrare de interblocare la distanță. Se utilizează un inel metalic înclinat la punctul intern de lansare a sursei laser/fibră pentru a minimiza reflexiile înapoi în dioda laser, măbind astfel stabilitatea diodei laser.

Pentru conectarea la dispozitive externe se folosește cablu optic cu un singur mod, P1-630 PM-FC-1 (FC/PC, 630 nm, PM Panda Style, 1 m). Aceste cabluri cu fibră optică au pachete de menținere a polarizării și sunt conectate la ambele capete cu conectori de înaltă calitate, cu cheie îngustă și ceramică FC. Aceste cabluri au un finisaj de înaltă calitate, ceea ce duce la o pierdere de întoarcere tipică de peste 50 dB.



λ operare	λ taiere	Extinctia minima	Pierderi maxime insertie	Diametrul modului de camp
620 - 850 nm	570 ± 50 nm	20 dB	1.2 dB	$4.2 \mu\text{m}$ @ 630 nm

Fig. 12 Sursa și dioda laser monomod

Fig. 13 Sistem reglaj vertical

Pentru a asigura reglaje optime ale componentelor optice (colimator, polarizare, focalizare, respectiv captare, colimare) și a celor de analiză ale rotirii planului de polarizare s-a ales un sistem compus din trei elemente, un reglaj vertical, pe ax 3TPH-13, combinat cu o măsura micrometrică de deplasare liniară 7T173, și o măsura de rotație micrometrică Mini 7R7.

Reglajul vertical este utilizat pentru reglarea înălțimii componentelor montate pe posturi de 12 mm sau echivalent. Intervalul de reglare a înălțimii grosiere este de 50 mm. După poziționarea corectă a poziției, sistemul este blocat cu un contact stabil din două linii, cu ajutorul unei șuruburi superioare cu soclu hexagonal. Reglarea precisă a înălțimii este efectuată apoi de un inel de reglare. O rotație a inelului deplasează postul în sus sau în jos cu 1 mm până la un total de 13 mm. Poziția exactă poate fi blocată cu ajutorul șurubului inferior (vezi figura 13). Măsura de translație (vezi figura 14 - stânga) permite mișcarea manuală liniară. Platforma este preîncărcată cu arc pe șurubul de antrenare pentru a asigura o înaltă rezoluție, o mișcare redusă, o mișcare netedă și precisă. O serie de găuri de montare pe o platformă și pe o bază oferă o varietate de opțiuni de montare convenabile. Măsura de rotație Mini 7R7 (vezi figura 14 - dreapta) asigură de asemenea o rotație netedă, cu frecare redusă de 360°. Un șurub de micrometru asigură o rezoluție de 1'. O deschidere de $\varnothing 15$ mm permite fixarea lentilelor și a filtrelor direct pe măsura. Un inel detașabil (de $\varnothing 6,5$ mm) poate fi înșurubat în diafragmă făcând adaptarea la șurub M6 din partea inferioară pentru a monta diferite componente.

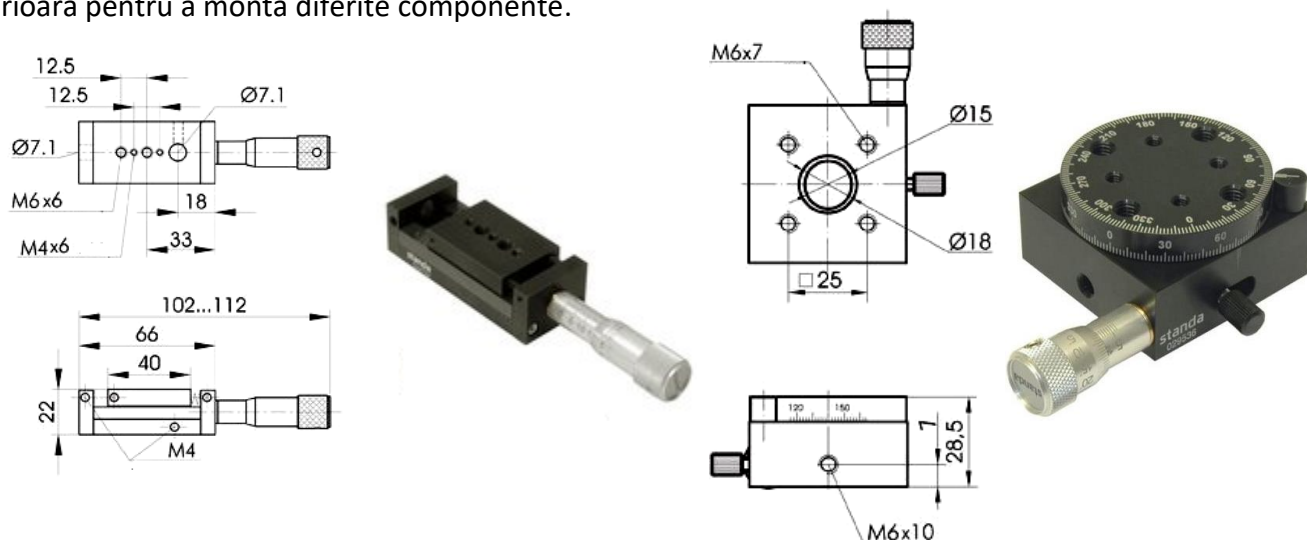
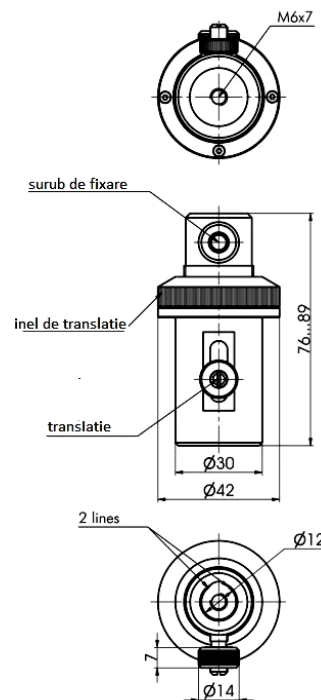


Fig. 14 Sistemul de reglaj liniar și unghiular

Activitatea 1.3: Proiectarea sistemului de detecție și de modulare opto-electronică.

Proiectarea acestui sistem s-a făcut pe baza fundamentelor efectului Kerr magneto-optic, MOKE, care se bazează pe proportionalitatea dintre unghiul de rotație Kerr (partea lui reală, contând pentru rotirea vectorului de polarizare) și magnetizarea filmului pe care se reflectă inițial un fascicul liniar polarizat de lumină. Lumina incidentă pe o suprafață magnetică, de obicei una de tip metal – compozit, patrunde 10÷50 nm în interiorul probei. Prin urmare, în ciuda faptului că MOKE nu este o tehnică pură de

suprafata, ca urmare a sensibilitatii inalte in detectarea modificarilor magnetizarii in interiorul stratului de suprafata a materialelor magnetice, efectul este utilizat in studiul magnetismului de suprafata si interfata, fiind foarte util in analiza structurilor cu grosimi nanometrice si putand fi adaptat in anumite conditii restrictive analizei dimensiunilor laterale micrometrice (fire, structuri, doturi) specifice unor micro-dispozitivele reale. Pe baza aceluasi efect Kerr functioneaza si majoritatea magnetometrelor magneto-optice comerciale. Evident, partea cea mai delicata a acestui dispozitiv se refera la modul de detectie al rotirii planului de polarizare, tinand cont ca in cazul unor filme ultrasubtiri, unghiurile implicate de rotire sunt de cateva miimi de grad (sau zecimi de minut). Principiul metodei de detectie propuse aici se bazeaza pe utilizarea unui modulator magneto-optic care sa permita amplificarea semnalului intr-un amplificator lock-in, comandat pe frecventa modulatorului magneto-optic.

La trecerea prin modulatorul Faraday (constand dintr-un baston de sticla introdus intr-o bobina care sa creeze un camp magnetic alternativ, in lungul bastonului, radiatia optica va suferii o rotatie a planului de polarizare data de:

$$\beta(t) = K(\lambda)LB_0\cos(\omega_m t) = K^*\cos(\omega_m t)$$

unde β este unghiul de rotatie (in radiani), B este densitatea fluxului magnetic in directia propagarii (in tesla), L este lungimea mediului de interactie lumina-camp magnetic (in metrii), K este constanta Verdet pentru material. Aceasta constanta empirica a proportionalitatii (in unitati de radiani per tesla pe metru) variaza cu lungimea de unda si temperatura pentru diferite materiale. Se ia in considerare directia de *polarizare* a luminii inainte de a intra in mediu de-a lungul axei Ox si directia *analizorului* de-a lungul Oy . Semnalul electric detectat de dioda va fi proportional cu $I = I_0 \sin^2 \beta$, iar semnalul electric alternativ va prezenta maxime consecutive de amplitudini egale. $A = I_0 K^*^2$. Daca campul magnetic armonic aplicat pe proba va roti directia de polarizare a luminii reflectate cu unghiul θ_K , rotatiile extreme ale vectorului E dupa trecerea prin mediul Faraday sunt: $\beta \pm \theta_K$ (cu $\beta = K^*$). In consecinta, semnalul electric alternativ va afisa maxime consecutive de amplitudini inegale, si anume: $A_1 = I_0 (K^* + \theta_K)^2$ si $A_2 = I_0 (K^* - \theta_K)^2$.

Daca se scad si se aduna aceste amplitudini, se obtine: $A_1 - A_2 = 4 I_0 K^* \theta_K$; $A_1 + A_2 = 2 I_0 (K^*^2 + \theta_K^2) \sim 2 I_0 K^*^2$

Pentru $\theta_K \ll K^*$ (conditie specifica unor rotiri ale vectorului de polarizare in filme foarte subtiri), raportul $R = (A_1 - A_2) / (A_1 + A_2) = 4 I_0 K^* \theta_K / 2 I_0 K^*^2 \sim \theta_K$, devine proportional cu θ_K . Aceasta estimare a fost simulata numeric iar valorile U_1 si U_2 au fost separate din semnalul I punand conditiile: $U_1 = (u_F > 0) \cdot I$;

$U_2 = (u_F < 0) \cdot I$. De mentionat ca aceste marimi au amplitudinile egale cu A_1 , respectiv A_2 (vezi figura de mai jos pentru $\theta_K = 0.1 \text{ deg}$). Raportul R se poate obtine fie din estimarea maximelor, fie din estimarea mediilor celor doua semnale. Cele doua metode se dovedesc a nu fi similare din punctul de vedere al sensibilitatii discriminarii intre cele doua semnale. De exemplu daca pentru $\theta_K = 0.1 \text{ deg}$, R este 0.0399 prin maxime si 0.0528 prin medii, pentru $\theta_K = 1 \text{ mdeg}$, R este 0.0004 prin maxime si 0.0025 prin medii, dovedind ca masurarea mediilor are o sensibilitate relativ mai mica a masuratorii.

Din punct de vedere experimental problema de baza consta in realizarea bastonului Faraday si comandarea corespunzatoare a acmpului magnetic in baston. Pentru excitatia bastonului Faraday este necesara o bobina alimentata in current AC (aprox. 1000Hz) construita astfel incat sa asigure o distributie de camp magnetic omogena in interiorul bastonului. In acest sens s-au facut simulari in programul Comsol Multiphysics pentru o bobina cu grosimea de 3.5mm si lungimea de 40mm formata dintr-un numar de 55 de spire din sarma de Cu de 0.7mm dimetru, infasurata in jurul unui baston Faraday cu diametrul de 6mm si lungimea de 30mm. Lungimea infasurarii o depaseste pe cea a bastonului (centrat in raport cu infasurarea) in scopul obtinerii unei omegenitati de camp mai mari la capetele acestuia. In figura [1] este aratata o sectiune longitudinala prin modelul introdus in simulare.

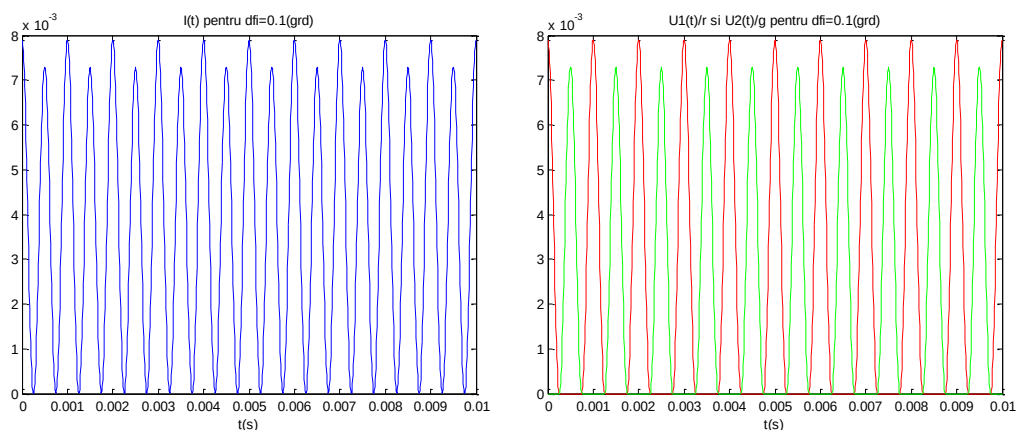
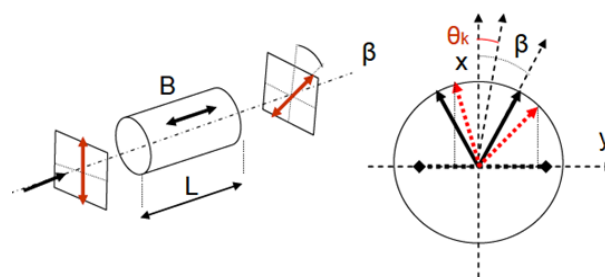


Fig. 15 Conceptia modulatorului magneto-optic tip baston Faraday (sus) si modul de interpretare al rezultatelor vizand semnalele inregistrate pe fotiododa (jos).

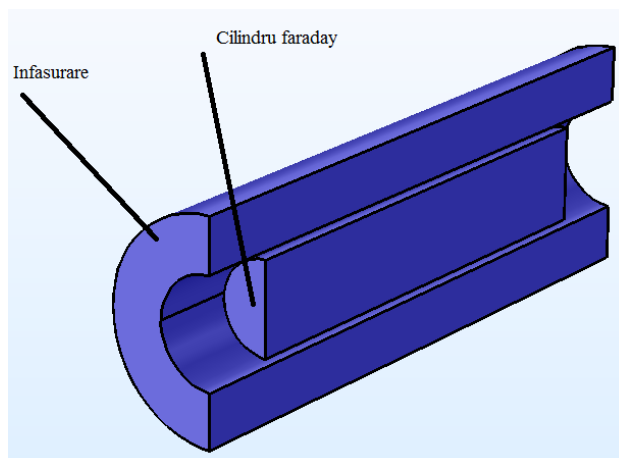


Fig. 16 Sectiune prin ansamblul baston Faraday-infasurare.

Materialele continand constantele fizice necesare in simulare au fost: cuprul pentru infasurare, quartul pentru bastonul Faraday si aerul pentru mediul ambiant. Folosind legea lui Ampere si permeabilitatea magnetica relativa, s-a obtinut cu o buna aproximatie o distributie de camp magnetic omogena. Pentru un curent de 1A in bobina, campul magnetic indus a este de 15Oe in centrul cilindrului. La extremitatea axiala a cilindrului intensitatea campului magnetic este de 13 Oe, avand aceeasi valoare cu cea din extremitatea radiala. In Fig. 2 se poate observa distributia campului magnetic in interiorul cilindrului Faraday in sectiune transversala, in Fig.3 fiind reprezentata dependenta intensitatii campului magnetic

de curentul aplicat in bobina pentru 4 puncte de coordonate diferite (centrul si extremitatile cilindrului) aflate in aceasta sectiune. Se observa ca pentru punctele dispuse radial la capetele cilindrului $(x,y) = (0,15)$ si $(3,15)$ evolutia intensitatii campului magnetic in raport cu curentul in bobine are o panta usor diferita fata cea a punctelor dispuse radial in centrul cilindrului $(x,y) = (0,0)$ si $(3,0)$, insa aceasta nu afecteaza drastic omogenitatea campului.

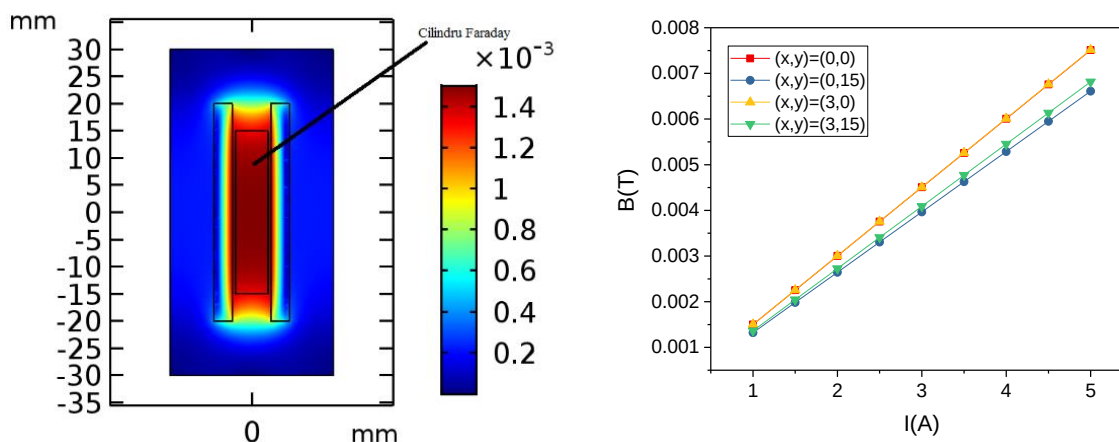


Fig. 17 Distributia relativ omogena a campului magnetic in volumul cilindrului Faraday (stanga) si evolutia intensitatii campului magnetic in raport cu intensitatea curentului in bobina pentru puncte geometrice aflate in centrul si in extremitatile cilindrului Faraday (dreapta).

Activitate 1.4 Proiectarea sistemului optic si a sistemului digital de achizitie date.

Solutia aleasa pentru masuratori de sensibilitate inalta implicand detectia raspunsurilor magnetice slabe, va fi adoptata o metoda de AC. Pentru detectia efectului Kerr magneto - optic indus in structuri magnetice cu grosimi de ordinul nanometrilor si dimensiuni laterale de ordinul micrometrilor se utilizeaza algoritmul descris in sectiunea anterioara, in care efectul Kerr (unghiul Kerr, in radiani) va fi dat de raportul $R=(A_1-A_2)/(A_1+A_2)$, unde $A_{1,2}$ sunt amplitudinile succesive ale semnalului electric sinusoidal detectat la fotodioda si ulterior amplificat de catre amplificatorul lock-in, care de asemenea moduleaza campul magnetic prin intermediul unui moulator Faraday.

Cea mai sensibila problema insa este legata de captarea semnalului provenind numai de la o structura magnetica cu dimensiune laterala micrometrica. Aceasta se poate realiza cu ajutorul unor facilitati speciale de focalizare a fasciculului incident, aliniere corespunzatoare a fasciculului activ, deplasare micrometrica a probei si deplasari micrometrice ale componentelor optice, inclusiv ale plasmantului camerei de vizualizare cu microscop. Sistemele tipice de masute micrometrice incrucisate la care s-a recurs in acest scop sunt prezentate in Figura 18. Proba este plasata pe o masuta de pozitionare cu precizie micrometrica (rezolutie 3D), cu rotire controlata, in timp ce urma fasciculului pe esantion este vizualizata printr-un microscop special, permitand astfel o scanare controlata a suprafetei esantionului. Realizarea unui sistem adecvat de translatie 3D cu grad de rotatie controlabil care sa permita atat o scanare potrivita a suprafetei probei cat si facilitati de magnetometrie vectoriala, a fost de asemenea o alta sarcina provocatoare.

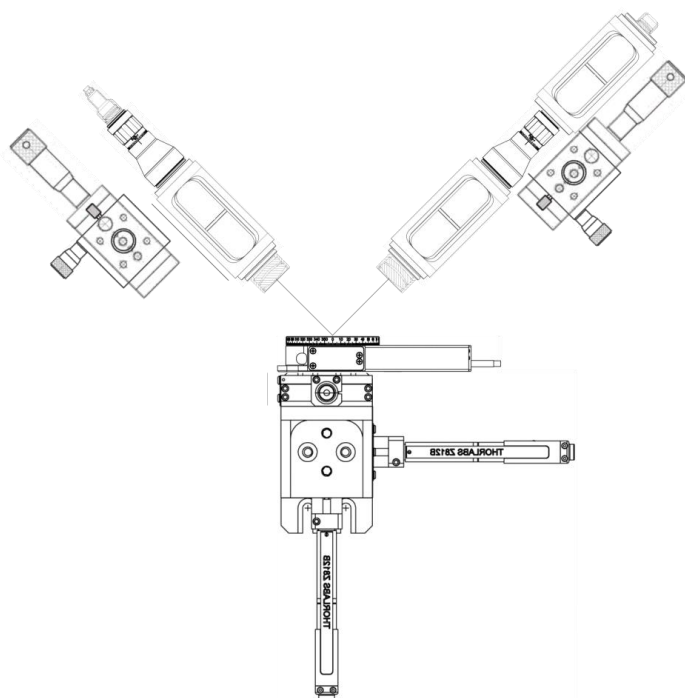
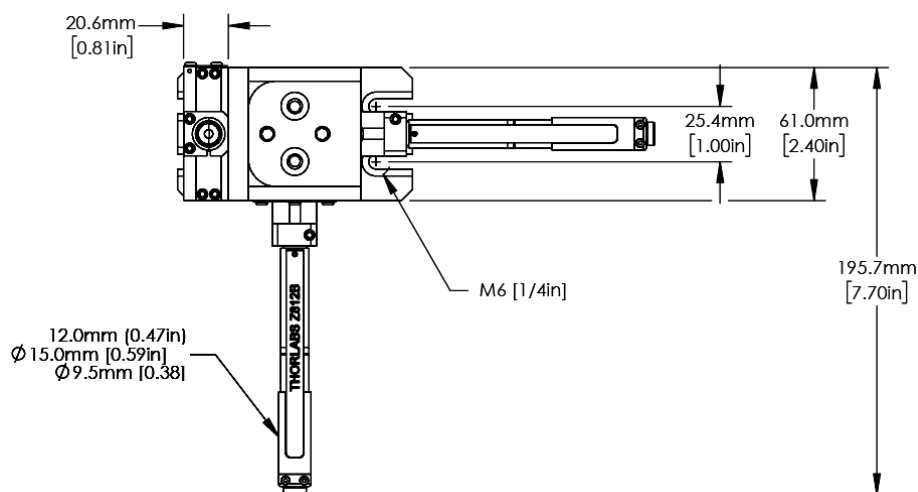


Fig. 18 Schema sistemului optic de focalizare/captare si scanare a probei

Activitatea 1.5: Proiectarea sistemului electro-mecanic de deplasare si rotire a probei.

Pentru micro-controlul deplasărilor pe trei axe a probei magnetice s-a ales sistemul MT3/M-Z8 (12 mm Three-Axis Motorized Translation Stage, M6, Thorlabs). Fiecare măsuță de translație monitorizată oferă mișcări liniare controlate electronic de-a lungul unei axe bine definite. Unitatea mono-axă asigură o deplasare de 12 mm pe o axă. Fiecare masă este echipată cu o matrice de orificii filetate la 25 mm x 25 mm, care include șapte filete M6 pentru compatibilitatea cu mecanica standard. Încărcăturile orizontale este de 9 kg și încărcăturile verticale de 4,5 kg sunt susținute de capul de angrenaj planetar 67: 1 al servomotorului, si au rulmenți din oțel întărit, pentru o mișcare precisă și o durată lungă de viață.



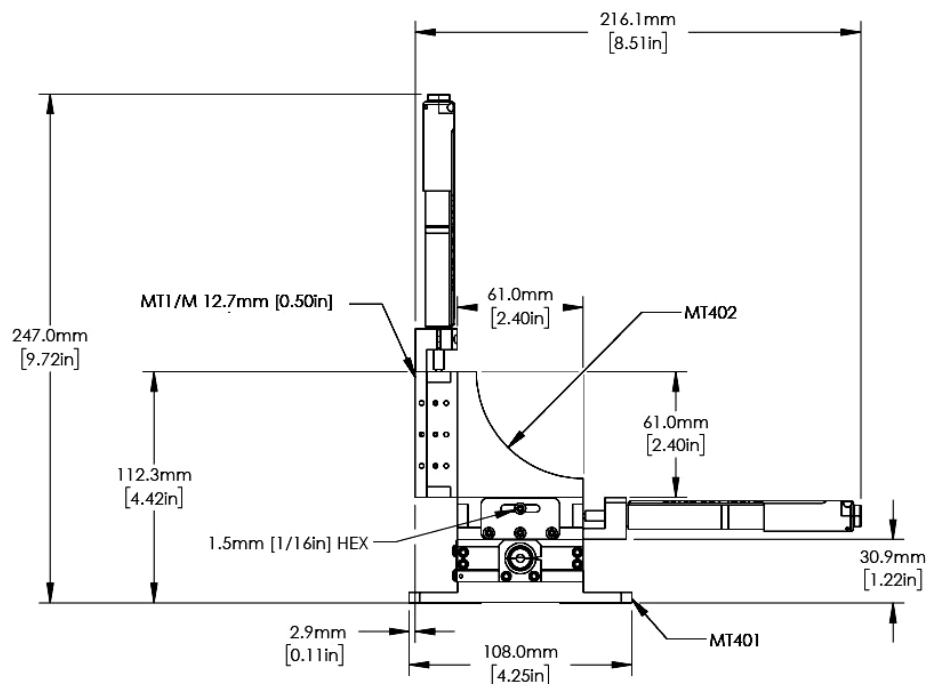
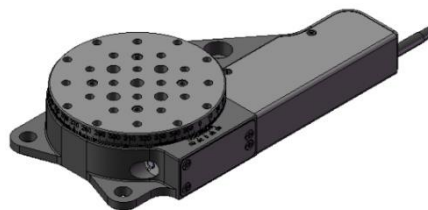
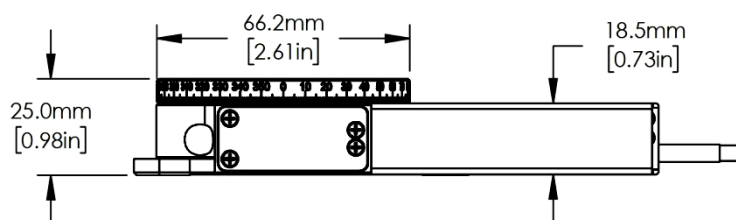


Fig. 19 Sistemul de depalsare pe trei axe controlat numeric

Deplasare maxima	12 mm
Viteza (Max)	3 mm/s
Deplasare minima	0.10 μ m
Repetabilitate bidirectionala	1.5 μ m
Revenire la pozitia initiala	<6 μ m
Incarcare orizontala maxima	9 kg
Incarcare verticala maxima	4.5 kg
Actuator	Z812B DC Motor
Lungime cablu	500 mm

Caracteristicile sistemului de depalsare pe trei axe controlat numeric

Pentru controlul suplimentar al rotirii probei magnetice sistemul de contro 3D s-a combinat și cu o măsura rotativă controlata numeric. Pentru acesta am ales modelul PRMTZ8 care asigură o rotație de 360 ° cu servomotor compact, cu o platformă cu filet. Se poate măsura deplasarea unghiulară a platformei utilizând scala Vernier (cu o rezoluție de 5 min de arc) împreună cu semnele de gradare marcate pe platforma rotativă cu incremente de 1°. Această măsura de rotație este de asemenea echipată cu un comutator de limită pentru a facilita rotirea automată la poziția inițială precisă de 0°, permițând ulterior poziționarea unghiulară absolută. Comutatorul de limită este proiectat pentru a permite rotirea continuă a treptei pe mai multe cicluri de 360 °.



Dimensiune	Ø 66.2 mm
repetitivitate bidirectionala	±0.1°
Revenire la pozitia initiala	±0.3°
Max Rotation Velocity	25 deg/sec
Incarcare orizontala pe ax	15 N (1.5 kg)
Increment de miscare	0.04°
Acuratete absoluta pe ax	0.10%
Acuratete la pozitia initiala	±0.2°
Domeniu	360° Continuu

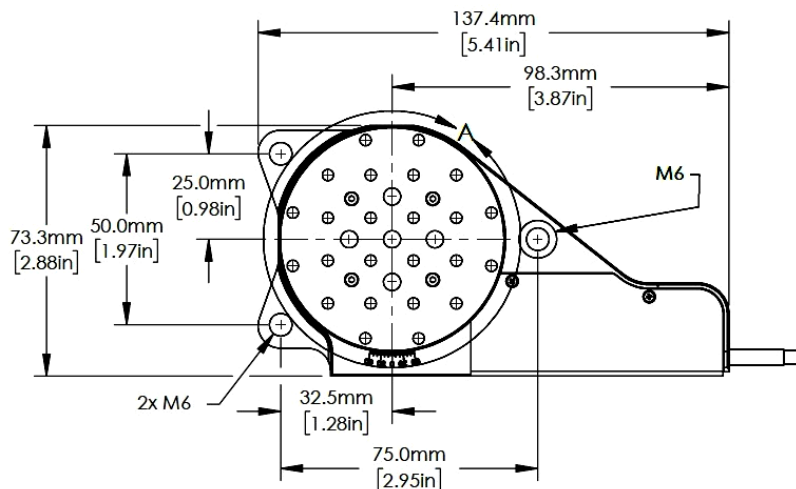


Fig. 20 Masuța rotativă controlată numeric

Pentru comanda numerică a sistemului 4D (trei axe de translație și una de rotație) interfața PC/soft-decomanda cu sistemul mecanic trebuie asigurată de o interfață hard. Ea este furnizată de KDC101 (K-Cube Brushed DC Servo Motor Controller). Sistemul cu servomotor DC este un controler de mișcare compacte "high-end". Este conceput atât pentru a asigura un control manual cât și automat ușor al servomotoarelor DC, acest driver unic este capabil să conducă motoare cu perii DC cu putere redusă (funcționare de până la 15 V / 2,5 W) echipate cu feedback. Setările software extrem de flexibile și reglajul cu buclă închisă asigură, de asemenea, operarea de diverse servomotoare DC și actuatoare. Unitatea este compactă (60.0 mm x 60.0 mm x 49.2 mm) permițând să fie poziționată în apropierea sistemului motorizat pentru o mai bună comoditate atunci când reglați manual pozițiile motorului utilizând comenzile panoului superior. Operarea permite de asemenea o lungime minimă a cablului de transmisie pentru o utilizare mai ușoară. Fiecare unitate conține, de asemenea, un comutator de alimentare din față care, atunci când este oprit, salvează toate setările reglabile de utilizator.

Conectivitatea USB asigură o operațiune simplificată "Plug-and-Play" controlată de PC cu două platforme software disponibile: pachetul software Kinesis sau pachetul software APT (Advanced Positioning Technology). Software-ul Kinesis dispune de noi controale .NET, care pot fi folosite de dezvoltatorii terți care lucrează în cele mai recente limbaje compatibile C++, Visual Basic, LabVIEW™, etc. sau orice alte limbi compatibile .NET pentru a crea aplicații personalizate. Software-ul APT permite utilizatorului să configureze rapid secvențe de mutare complexe, cu comenzi avansate făcute prin intermediul mediului de programare ActiveX®. De exemplu, toți parametrii de operare relevanți sunt setați automat de software-ul pentru produsele Thorlabs și produsele de acționare. Unitatea are opțiuni de alimentare cu

un singur canal și mai multe canale disponibile separat, extensia multi-axă utilizând Hub-uri de control USB separate.

Alimentarea sistemului de controlere de deplasare se face cu KPS101, care poate furniza până la 2,4 A și poate acționa un singur K-Cube. Acesta se conectează la o priză standard de perete și asigură +15 Vcc. Hub-urile KCH601 sunt compuse din două părți: butucul care poate suporta până la șase (KCH601) K-cuburi sau cuburi T și o sursă de alimentare care se conectează la o priză standard de perete. Hub-ul asigură un curent maxim de 10 A. În plus, hub-ul oferă conectivitate USB la orice K-Cube sau T-Cube conectat printr-o singură conexiune USB.

Activitatea 1.6 Proiectarea sistemului de generarea a campului magnetic.

Proba trebuie plasată într-un câmp magnetic precis controlabil, de cel puțin ± 1 kOe valoare maximă, generat de o pereche de doi solenoizi cu întrefier special proiectat. Prin alimentarea adecvată a fiecărei perechi, vor fi generate câmpuri magnetice fie în planul de incidență, fie perpendicular pe acesta, atât pentru măsurători longitudinale, cât și transversale. Problema tehnică se referă la asigurarea omogenității câmpului la nivelul probei și la stabilirea relaționalității dintre curentul pe bobina și valoare câmpului. Soluția tehnică propusă pentru sistemul de generare a câmpului magnetic este un electromagnet format dintr-un miez asamblat din tole de Fe-Si (otel electrotehnic) de 0.35mm grosime (în forma literei C) și două bobine plasate la capetele miezului (Figura 21). Miezul magnetic are o secțiune patrată cu latura de 40mm, la capetele acestuia (polii magnetici) latura secțiunii fiind redusă la 15mm pentru a asigura o concentrare a liniilor de câmp în zona probei. Bobinele sunt realizate din sarmă de Cu cu diametrul de 2mm pentru a permite alimentarea la un curent maxim de 15-20 A și având un număr de 450 spire. Distanța dintre polii magnetici este stabilită la 20mm pentru a permite poziționarea și manevrarea optimă a probei. Distribuția câmpului magnetic între polii electromagnetului a fost simulată prin metoda elementelor finite, utilizând programul dedicat Comsol Multiphysics. Modelarea electromagnetului s-a făcut utilizând legea lui Ampere ($\nabla \times H = J$; $B = \nabla \times A$) în mai mulți pași: construirea geometriei 3D a ansamblului miez-bobine și a domeniului ambiant în care se face calculul numeric al câmpului magnetic; definirea materialelor utilizate pentru miez (Silicon Steel GO 3%), bobine (Cu) și respective ambiant (aer); definirea parametrilor pentru bobine (număr de spire, secțiunea conductorului, valoarea și sensul curentului prin conductor); discretizarea geometriei; aplicarea solver-ului și reprezentarea soluțiilor. Tolele de Fe-Si sunt utilizate în special în fabricarea transformatoarelor electrice deoarece acest material prezintă o coercivitate magnetică relativ mică, valoare mare a magnetizării de saturare și un cost relativ scăzut, iar din punct de vedere constructiv este ușor de modelat. Există și alte materiale care pot asigura și chiar depăși caracteristicile magnetice, însă costul acestora este foarte ridicat (Fe pur, aliaje de tip Permalloy pe bază de Fe-Ni) și nu sunt disponibile pe piața indigenă. Fe-Si sub formă laminată se găsește în diferite proporții și diferite tratamente termice cu graunțele de Fe orientate sau neorientate în raport cu o anumită direcție. Laminările de Fe-Si cu graunțele orientate sunt cel mai des utilizate în construcția transformatoarelor deoarece prezintă o anizotropie magnetică mai mare pe direcția pe care se propaga liniile de câmp decât pe direcția perpendiculară, implicând valori mai mari ale permeabilității magnetice relative decât în cazul în care graunțele sunt neorientate (permeabilitate magnetică izotropă). În simulări s-a ales ca material Fe-Si cu graunțele orientate și ca relație constitutivă relativ la legea lui Ampere s-a considerat curba $B(H)$ a acestui material (Fig. 22) deoarece conține variația cu câmpul a permeabilității magnetice relative. Pentru mediul extern (aerul) s-a considerat ca relație constitutivă permeabilitatea magnetică relativă deoarece aceasta nu variază cu câmpul aplicat. În cazul unui circuit magnetic deschis (electromagnetul), curba BH

a miezului magnetic este alterata (se liniarizeaza) de prezenta in circuit a unei reluctante magnetice mari data de stratul de aer dintre poli, permeabilitatea magnetica efectiva a circuitului fiind definita in acest caz prin relatia:

$$\mu_{ef} = \frac{\mu_r}{1 + k(\mu_r - 1)}$$

unde k este factorul de demagnetizare al miezului, iar μ_r este permeabilitatea relativa a materialului din care este realizat miezul electromagnetului. Distributia de camp intre polii magnetici (Fig.3a) s-a facut pentru mai multe valori ale curentului electric in bobine, obtinandu-se curba aratata in Fig. 3b in punctul aflat la jumatatea distantei dintre polii magnetici.

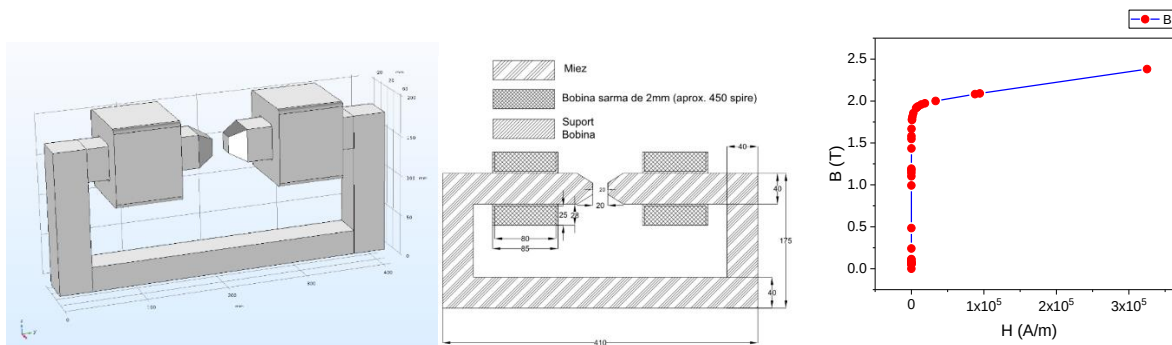


Fig.21 Bobina fixa (configuratie 3D, configuratie 2D si caracteristica B-H pentru Fe-Si cu graunte orientate, luate in considerare in analiza numerica.

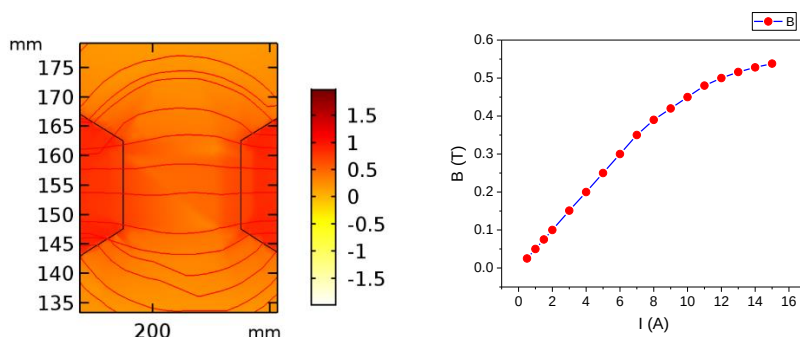


Fig.22 Distributia de camp intre poli si inductia magnetica calculate la jumatatea distantei dintre poli.

Activitati 1.7 si 1.8: Proiectarea componentelor sistemului de achizitie, control si procesare a datelor si proiectarea demonstratorului tip sistem magneto-optic functional.

Din punct de vedere conceptual, lantul de detectie a fost proiectat in vederea unei automatizari complexe si in scopul obtinerii setului de masuratori de baza si cu posibilitati deschise pentru dezvoltarea ulterioara de catre utilizator. Întregul sistem MOKE, atat partea optică, magnetică, controlul scanării, si sursele de alimentare, sunt montate pe o placă de bază din aluminiu, nemagnetica, care oferă o platformă convenabilă pentru asamblarea sub-sistemelor (Figura 23).

Finisajul cu un strat anodizat de culoare neagră, asigură minimizarea reflexiilor, și au filete perforate de 25 mm (metric) cu orificii dispuse la o distanță de 12,5 mm, de la marginea plăcii. Orificiile sunt filetate complet prin panou, permițând componentelor să fie montate pe ambele părți simultan. Mișcarea motoraselor vizand atat pozitionarea probei cat si scanarea structurii de domenii este conceputa a se realiza automatizat, ca si prelucrarea semnalelor acizitionate de pe fotodioda si amplificate in lock-in. Tot de pe calculator se va comanda curentul in bobina DC (care asigura campul intre polii magnetului ce

magnetizeaza proba), iar imaginea structurilor micrometrice preluata de camera va fi vizualizata fie direct pe un monitor fie pe calculator.

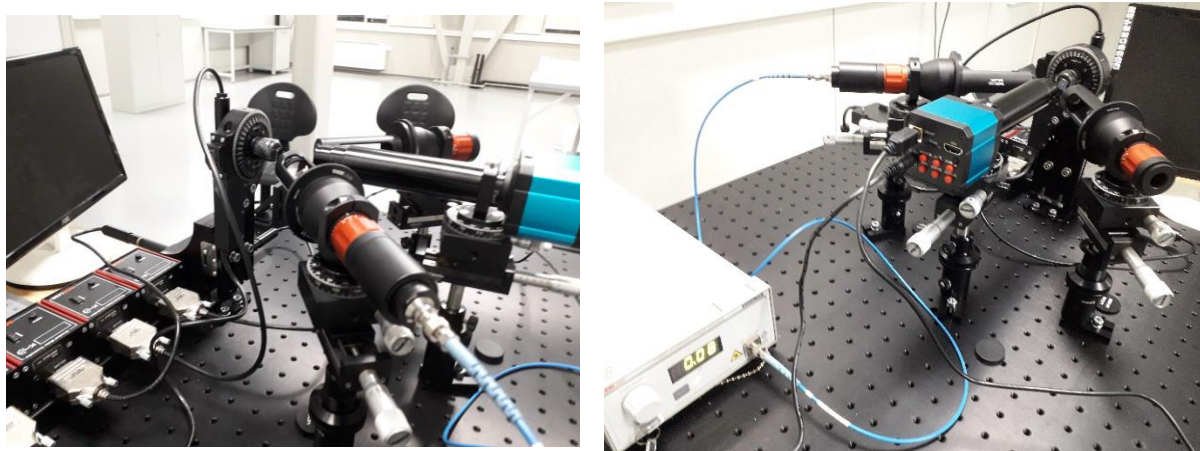


Fig. 23 Prototipul sistemului integrat MOKE pentru analiza magnetometrica vectoriala a microstructurilor magnetice.

Verificarea performantelor optice si magnetice ale dispozitivului trebuie facuta in urmatorul pas pe structuri micrometrice corespunzatoare. In acest sens s-au demarat deja procedurile de preparare de structuri micrometrice corespunzatoare, atat prin utilizarea foto-litografiei cat si a litografiei cu electroni. Structurile obtinute foarte recent, care sa permita realizarea etapei a doua de interconectare si operabilitate a demonstratorului sunt prezentate in figura 24.

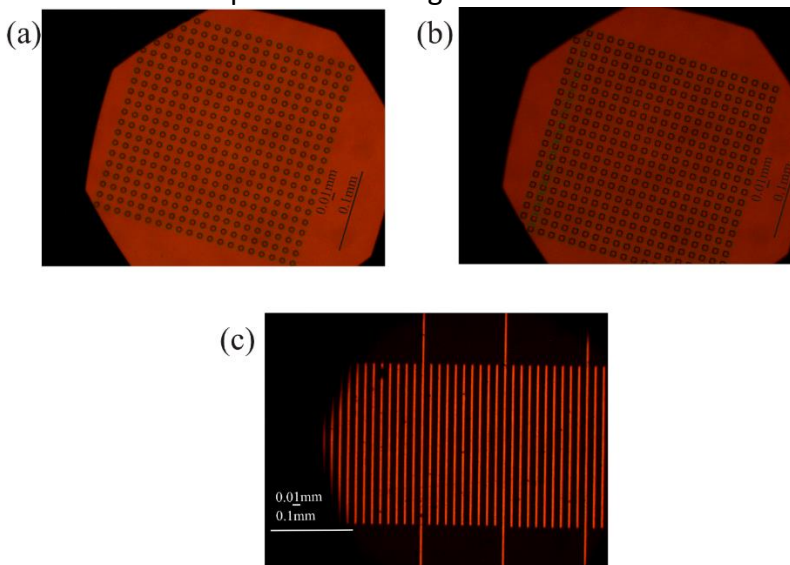


Fig. 24 Cercuri cu diametrul de 4 μm , (a) Patrate cu latura de 6 μm , (b) gradatie cu diviziunea de 0.01 mm (c)

Gradul de realizare al obiectivelor si rezultatele etapei: In etapa actuala a fost definitivata proiectarea intregului ansamblu multifunctional (implicit a fiecarei componente) si realizarea si interconectarea unei parti insemnate a componentelor acestuia. Bobina fixa asociata electromagnetului centrat pe proba si bobina de comanda a modulatorului Faraday sunt in etapa finala de realizare si se vor adauga

ansamblului interconectat pana la sfarsitul anului. In etapa a doua a proiectului vor fi realizate softurile de comanda a motoraselor, de prelucrare a semnalelor achizitionate si de implementare in program a diverselor metodologii de masura. Posibilitatile magnetometriei vectoriale (determinarea directiilor locale de anizotropie cat si distributia unghiulara a axelor de usoara magnetizare) vor fi completate cu posibilitatile de obtinere a structurii specifice a domeniilor magnetice in filme subtiri, multistraturi si nanofire micropstructurate, precum si cu optiuni de masuratori de magneto-rezistenta. Sistemul va fi testat pe probe cu dimensiuni laterale micrometrice si grosimi nanometrice preparate tot de echipa de implementare.

Rezultatele obtinute pana in prezent au facut obiectul a 3 prezentari la conferinte internationale si 3 articole publicate in reviste ISI.

Cele 3 conferinte au fost:

1. Optics and Photonics 2017, San Diego (USA) 6-10 august 2017, SPIE International Conference, Sectiunea "Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices XIV", lucrare prezentata ca poster.
2. Mediteranean Conference on the Applications of the Mossbauer Effect MECAME 2017, Ierusalim (Israel), lectie invitata
3. International Conference on the Applications of the Mossbauer Effect ICAME 2017, Saint Petersburg (Russia), lectie invitata

Cele 3 articole ISI, au fost:

1. Structure, transition temperature and magnetoresistance of titanium-doped lanthanum barium magnetite epilayers onto STO 001 substrates, Applied Phys. Lett. 111, 18 (2017) 182409, AC Galca, M.Oumezzine, A.Leca, CF Chirila, V.Kuncser, A. Kuncser, C.Ghica, I.Pasuk, M.Oumezzine
2. Physical mechanisms of exchange coupling effects in nanoparticulate Diluted Magnetic Oxides obtained by Laser Pyrolysis, J.Phys.Chem.C., 121, 16 (2017) 9063, V.Kuncser, G.Schinteie, A.Kuncser, A.Leca, M.Scarisoreanu, M.Morjan, G. Filoti
3. Tuning magneto-transport properties of Fe-Au granular thin films by cluster organization, J.Phys.D.-Applied Physics, 50, 27 (2017) 275004, A.Stanciu, A.Kuncser, G.Schinteie, P.Palade, A.Leca, S.Greculeasa, A.Catrina, V.Kuncser