

RAPORT FINAL

privind implementarea proiectului 95PED/2017 in perioada ianuarie 2017-iulie 2018

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

Obiectivele prevazute/realizate: Proiectul si-a propus proiectarea si realizarea unui dispozitiv magneto-opto-electronic avansat, de inalta precizie, pentru masurarea simultana a proprietatilor magnetice si de transport electronic in structuri magnetice cu dimensiuni laterale micronice si grosimi nanometrice. In acest sens a fost realizat si testat un demonstrator magneto-optic functional, care sa permita pozitionarea cu precizie micrometrica a probei intr-un fascicul laser focalizat (diametrul spotului tot la nivel micrometric) si achizitionarea de semnale emergente care sa furnizeze informatii despre magnetizarea micro-structurilor magnetice, prin intermediul efectului Kerr magneto-optic. Au fost preconizate atat capacitati de mapare spatiala de intensitate si unghi de rotatie Kerr (contrast geometric si contrast magnetic) cat si de determinare a dependentei unghiului de rotatie Kerr de campul magnetic aplicat cu diverse orientari fata de axe de usoara magnetizare. Un alt obiectiv major al proiectului a constat in realizarea sistemelor magnetice micro-structurate pe care sa se faca testarea capabilitatilor demonstratorului.

Gradul de atingere a rezultatelor estimate (prezentarea produsului/tehnologiei sau serviciului rezultat al proiectului):

S-a realizat proiectarea intregului ansamblu multi-functional, achizitionarea de componente optice si mecanice corespunzatoare si respectiv proiectarea si realizarea in laborator a restului componentelor de baza legate de generarea campurilor magnetice statice si oscilante, interfatare, achizitie semnal, etc. Toate componentele optice si electronice ale demonstratorului tip magnetometru MOKE vectorial multifunctional au fost interconectate, cu dezvoltarea corespunzatoare a partilor hardware si software necesare pozitionarii corecte a structurilor micrometrice in fasciculul focalizat, respectiv in obtinerea semnalului electric furnizor al unghiului de rotatie Kerr. Demonstratorul a fost testat in raport cu cerintele impuse in proiect, demonstrandu-se atingerea performantelor cerute. A fost dezvoltat un software de scanare de baza (cu posibilitati de dezvoltare ulterioara) iar semnalul electric pentru furnizarea rotatiei Kerr a fost obtinut corespunzator, urmand ca prelucrarea lui numerica sa fie implementata in softwareul general. Au fost obtinute sistemele de filme subtiri si microstructuri magnetice cu grosimi nanometrice necesare testarilor.

Demonstratorul, care are deja implementat un pachet hardware si respectiv software de baza, care sa permita focalizarea, scanarea, si pozitionarea fasciculului pe structura de interes precum si obtinerea unui

semnal corespunzator pe foto-diada, semnal din a carui prelucrare sa rezulte unghiuri de rotire ale vectorului de polarizare dependente de magnetizarea variabila din proba, este prezentat in Figura 1.

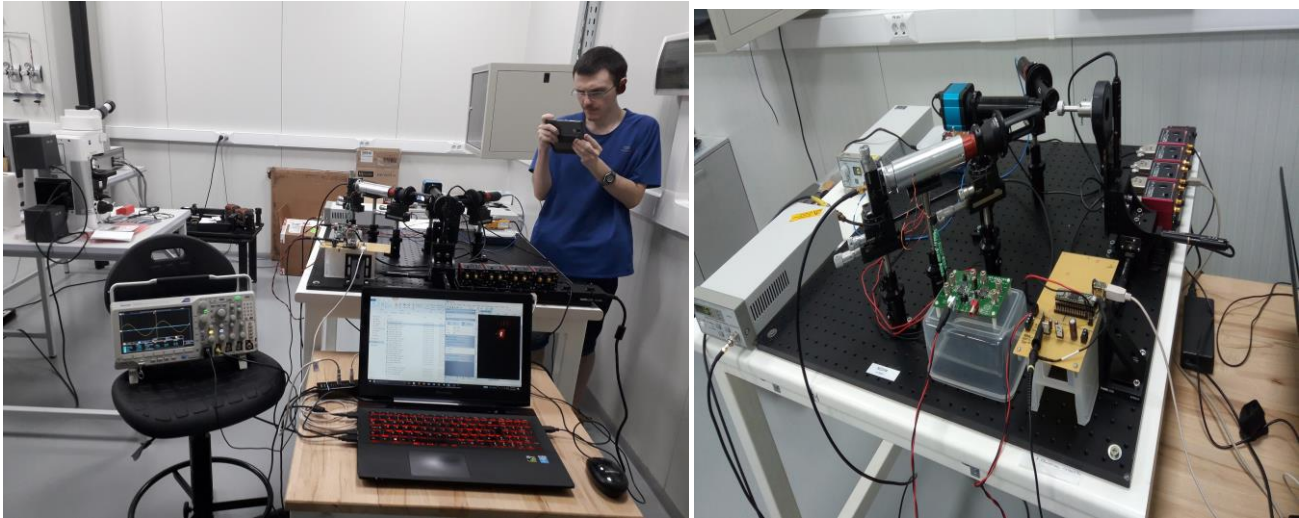


Figura 1. Demonstrator sistem modular μ -MOKE vector magnetometru multi-funcțional

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 2, care sa poata fi dezvoltat permanent, atat in privinta aspectelor hardware cat si a celor software, depinzand de interesul particular al fiecarui utilizator. S-a conceput un sistem care sa fie complet automatizat si comandat de un calculator care sa permita prelucrarea si stocarea convenabila a datelor. Aplicația software implementata va ramane 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 sunt implementați).

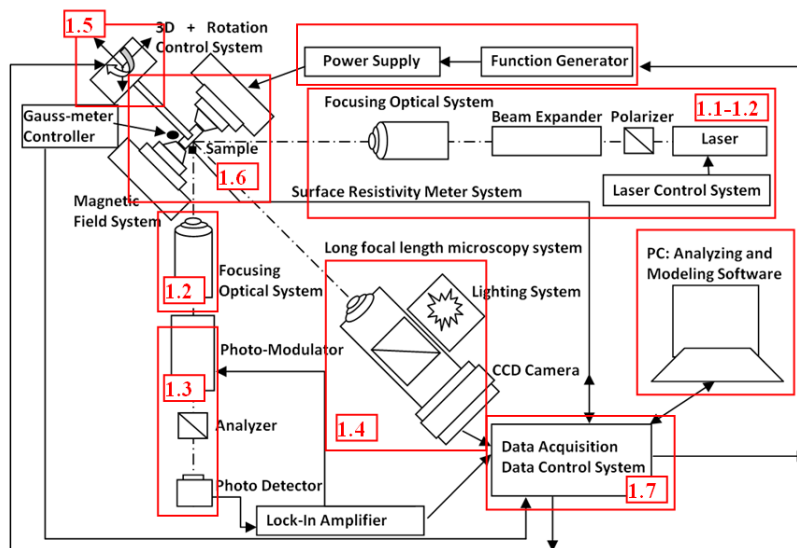


Figura 2 Sistemul modular μ -MOKE vector magnetometru multi-funcțional

Proiectarea sistemului optic de focalizare:

Microscopul de domenii magnetice, al cărui principiu este tot efectul Kerr, sunt adecvate în general măsurării întinderii domeniilor magnetice (cu rezoluții micrometrice) în filme relativ groase, implicând modificări mari ale unghiului Kerr. Pe de altă parte, o combinație de MOKE focalizat cu posibilități de scanare a suprafeței sub o localizare microscopică a fasciculului incident este foarte utilă atât în detecția proceselor de magnetizare a micro-structurilor locale (filme subțiri micro-structurate, micro-fire magnetice, etc.) cât și în mapearea structurii de domenii a acestora, sub influența unui câmp magnetic aplicat, chiar și în condiții în care acestea au dimensiuni nanometrice. Această tehnică non-invazivă, are rezoluția spațială limitată doar de rezoluția optică (dimensiuni laterale ale fascicolului focalizat de ordinul μm).

La proiectarea sistemului de focalizare s-a plecat de la premisa necesității folosirii unei surse de radiații monocromatice, bine polarizate și cu coerență relativ mare (laser He-Ne cu lungimea de undă de 633 nm sau dioda laser cu lungime de undă apropiată), pentru a putea controla atât focalizarea pe o arie cât mai mică a fasciculului incident cât și o bună analiză a unghiului de rotație al planului de polarizare al radiației la reflexia pe structura magnetică (microstructura metalică cu dimensiuni nanometrice). 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 expandor/colimator, care face adaptarea de dimensiune dintre fasciculele furnizate de sursa de lumină și sistemul de focalizare pe proba. 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. 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 lampă cuplata la un monocromator, cu scopul generării dependentelor de lungimi de undă diferite. Celălalt drum optic, cel al sistemului microscopic de vizualizare directă a probei, va avea drept sursă o lampă cu vapori de mercur sau, grație designului modular al sistemului, o dioda super-luminescentă, la incidența normală, într-un sistem microscopic cu reflexie, pentru observarea domeniilor magnetice.

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 fasciculului 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 softul OpTaliX și OSLO. S-a ales un sistem dublet cu separare de aer realizat din sticlă de tip LASF35 (catalog Schott). Ca urmare a analizelor privind sistemul de focalizare a radiației optice, s-

a ales achiziția unui dublet existent în comerț. Dubletul ales a fost ACA254-050-A (Air-Spaced Achromatic Doublet, AR Coating: 350-700 nm, $f=50$ mm WD 41.4mm de la Thorlabs, Inc.).

Pentru a asigura intrarea în dubletul de colimare a unei undă plane cu un front de undă cât mai uniform, s-a ales expandarea fasciculului inițial de lumină cu un factor x5, fapt care asigură și o reducere corespunzătoare a divergenței inițiale a fascicolului. A fost ales expanderul GBE05-A (5X Achromatic Galilean Beam Expander, AR Coated: 400 - 650 nm, de la Thorlabs, Inc.). 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 proiectat. Lentilele sunt fabricate 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.

Deoarece fasciculul incident pe proba magnetică trebuie să fie polarizat, s-a ales un polarizor de câmp, LPVISO (50-MP2 Ø12.5 mm SM05-Mounted Linear Polarizer, 550 - 1500 nm). Aceste polarizatoare constau din nano-particule elipsoidale 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 cei pe baza de polimeri absorb lumina polarizată perpendicular pe axa transmisiei, nanoparticulele au un prag de distrugere semnificativ mai mare și un raport de extincție mult mai bun. 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 expander de fascicul s-a ales utilizarea unui tub de montaj, de tipul SM1 (Slotted Lens Tube, 3" Thread Depth, with 2 Retaining Rings, Thorlabs).

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 limita 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.

Pentru a asigura reglajele 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.

Proiectarea sistemului de detectie a rotirii planului de polarizare si de modulare magneto-optica:

Proiectarea acestui sistem s-a facut pe baza fundamentelor efectului Kerr magneto-optic, MOKE, care se bazeaza pe proportionalitatea dintre unghiul de rotatie Kerr (partea lui reala, contand pentru rotirea vectorului de polarizare) si magnetizarea filmului pe care se reflecta initial un fascicul liniar polarizat de lumina. Lumina incidenta pe o suprafata magnetica, de obicei una de tip metal – compozit, patrunde 10÷50 nm in interiorul probei. Prin urmare, in ciuda faptului ca MOKE nu este o tehnica pura 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 aceluiasi 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).

In aceste conditii, principiul metodei de detectie propuse aici se bazeaza pe utilizarea unui modulator magneto-optic care sa induca un semnal optic cu intensitate variabila periodic in timp, efectul suplimentar indus de magnetizarea probei asupra semnalului periodic fiind reflectat in dezechilibrul amplitudinilor a doua oscilatii succesive. La trecerea prin modulatorul Faraday (constand dintr-un baston de sticla introdus intr-o bobina care creaza un camp magnetic alternativ de frecventa ω_m si amplitudine B_0 (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 per 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 $A=I_0K^{*2}$ si ca urmare va avea o frecventa de $2\omega_m$. 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 (Fig.3): $\beta \pm \theta_K$ (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: $A_1-A_2=4 I_0 K^* \theta_K$; $A_1+A_2= 2I_0 (K^{*2}+\theta_K^2)\sim 2I_0 K^{*2}$. Pentru $\theta_K \ll K^*$ (conditie specifica unor rotiri ale vectorului de polarizare in filme foarte subtiri), raportul $R = (A_1-A_2)/(A_1+A_2) = 4$

$I_0 K^* \theta_K / 2I_0 K^{*2} \sim \theta_K$, devine proporțional cu θ_K . Ca urmare, problema determinării unghiului de rotire a planului de polarizare se reduce la determinarea cu precizie a dezechilibrului în amplitudine indus de magnetizarea probei în cele două oscilații consecutive de frecvență dublă (perioada înjumătățită) care se formează sub un semnal de frecvență modulatoare ω_m (echivalent perioadă simplă).

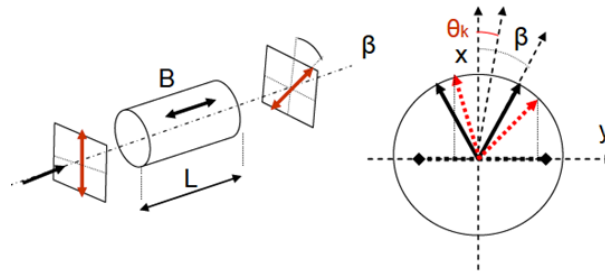


Figura 3 Conceptia modulatorului magneto-optic tip baston Faraday (sus) si descrierea grafica a metodologiei de obtinere a unghiului de rotire θ_K .

Din punct de vedere experimental problema de baza consta în realizarea bastonului Faraday și comandarea corespunzătoare a câmpului magnetic în baston. Pentru excitația bastonului Faraday este necesară o bobină alimentată în curent AC (în domeniul 100-1000 Hz) construită astfel încât să asigure o distribuție de câmp magnetic omogenă în interiorul bastonului (figura 4). În acest sens s-au făcut simulări în programul Comsol Multiphysics pentru o bobină cu grosimea de 3.5mm și lungimea de 40mm formată dintr-un număr de 55 de spire din sarma de Cu de 0.7mm diametru, înfășurată în jurul unui baston Faraday cu diametrul de 6mm și lungimea de 30mm. Lungimea înfășurării o depășește pe cea a bastonului (centrat în raport cu înfășurarea) în scopul obținerii unei omogenități de câmp mai mari la capetele acestuia.

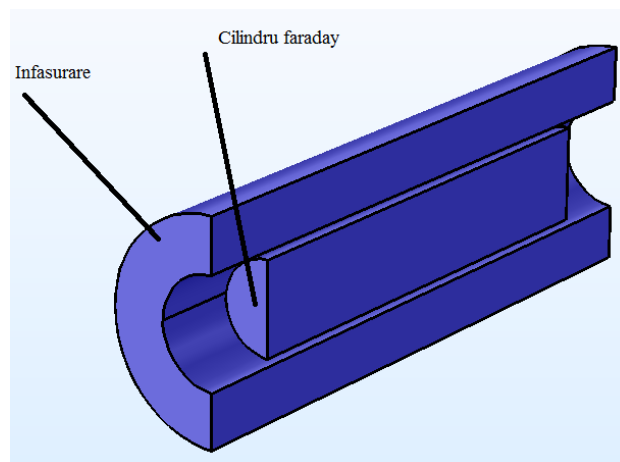


Figura 4 Secțiune prin ansamblul baston Faraday-înfasurare.

Materialele continand constantele fizice necesare in simulare au fost: cuprul pentru infasurare, cartul pentru bastonul Faraday si aerul pentru mediul ambiental. 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 150e in centrul cilindrului. La extremitatea axiala a cilindrului intensitatea campului magnetic este de 13 Oe, avand aceeasi valoare cu cea din extremitatea radiala. In Figura 5 se poate observa distributia campului magnetic in interiorul cilindrului Faraday in sectiune transversala, in dreapta 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 $(3,0)$, inasa aceasta nu afecteaza drastic omogenitatea campului.

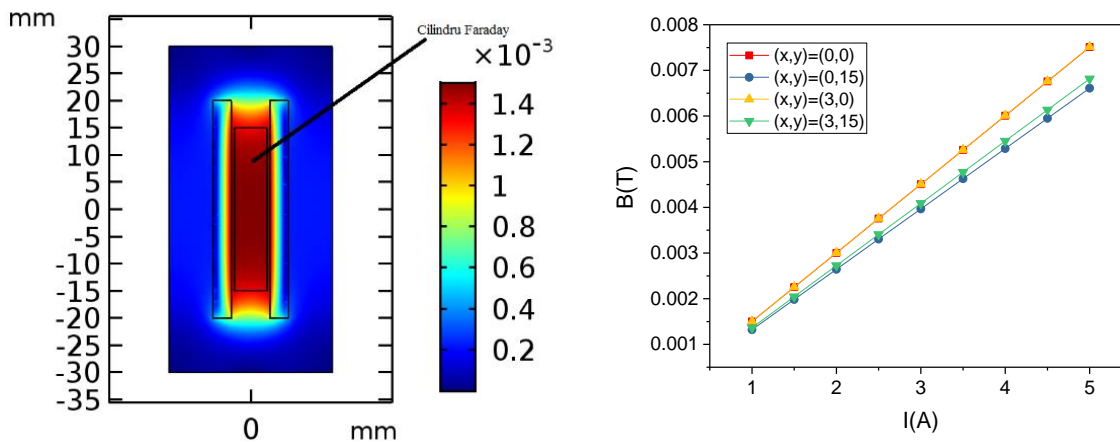


Figura 5 Distributia relativ omogena a campului magnetic in volumul cilindrului Faraday (stanga) si evolutia intensitatii campului magnetic in raport cu intensitatea curentului in bobina pentru puncte geometrice aflate in centrul si in extremitatile cilindrului Faraday (dreapta).

Dezvoltarea de coduri/programe software pentru implementarea diferitelor metodologii de masura:

In continuare se va descrie atat partea hardware cat si partea software (de interfatare) legata de prelucrarea semnalelor optice specifice interactiei radiatiei laser polarizate cu suprafata microstructurii magnetice in demonstratorul realizat. Lantul de masura optic si respectiv lanturile de comanda si prelucrare electrica a semnalului vor fi descrise separat, cu referire la fiecare piesa implicata (numerotata corespunzator in Figura 6).

Calea optica pornește de la o dioda laser produsa de Thorlabs cu lumina transmisa printr-o fibra optica (1), cu blocul de alimentare și control (2), produs de aceeași firma. Raza laser trece printr-un sistem de polarizare, focalizare și centrare pe orizontala (3) înainte de a ajunge la proba prinsă într-un sistem port-proba (4), prevazut cu stagii de deplasare produse de Thorlabs. Sistemul de control și alimentare al stagiilor de deplasare (5) este produs tot de Thorlabs, fiind compus din 4 blocuri modulare puse pe o

baza ce asigura alimentarea și distribuirea mesajelor de control venite de la calculatorul de comanda (6) către blocul destinație corect. Port-proba are 4 grade de libertate: câte unul pentru fiecare din cele 3 axe ortogonale ale spațiului, precum și pentru rotirea probei în jurul unei axe paralele cu planul razelor laser incidenta și reflectata pe proba. Aceasta axa este perpendiculara pe planul probei și este deplasata în spațiu de către celelalte stagii de deplasare. Din acesta cauza, rotirea unui singur element de pe proba în jurul propriului centru de simetrie necesita o repositionare corespunzatoare a port-probei în planul acesteia.

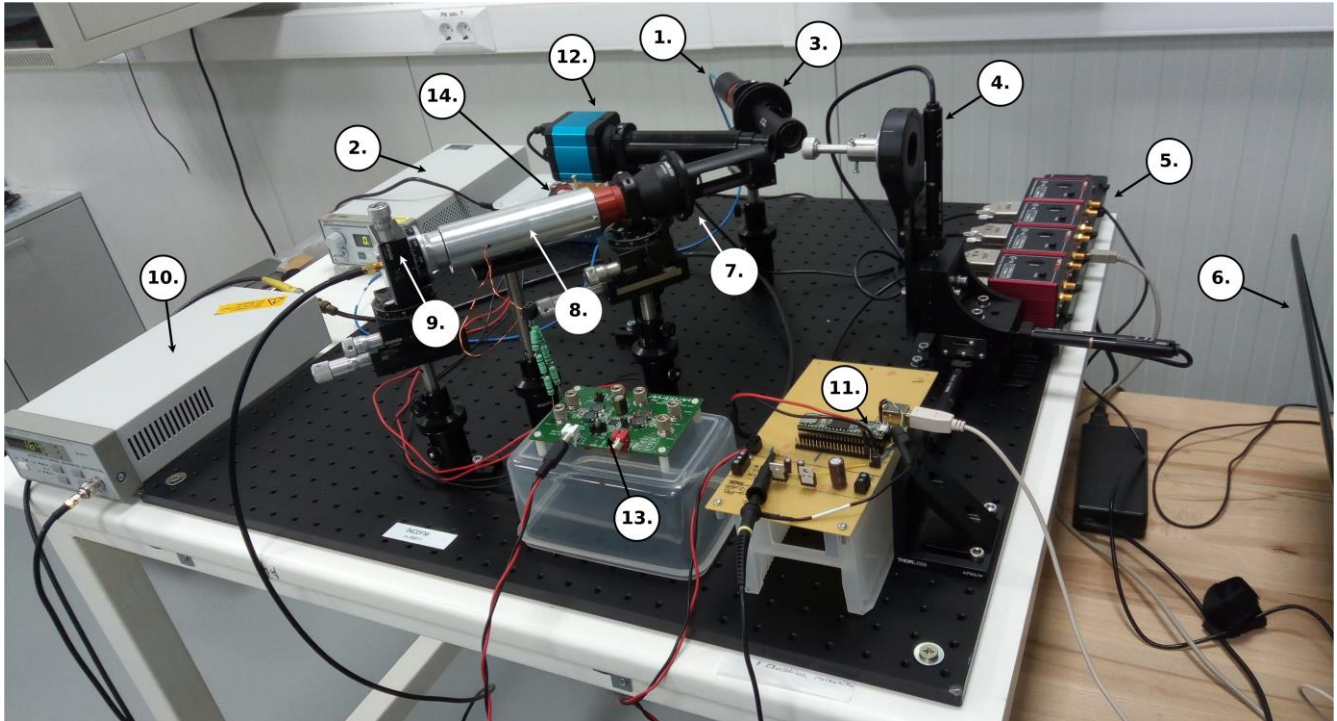


Figura 6: Componente optice și blocuri electrice definitorii pentru demonstratorul realizat (electromagnetul care aplica câmp magnetic static dorit în planul probei a fost îndepărtat pentru o vizualizare corespunzătoare).

După reflexia pe proba, raza laser trece printr-un alt sistem de focalizare și centrare (7), identic cu cel de pe direcția incidenta (3), dar fără polarizor. Acesta are montat în continuarea lui o montura de metal pentru modulatorul de direcție de polarizare (8). Acest modulator conține o bobina care are în interior un baston de sticlă. Acesta din urmă rotește direcția de polarizare a razei laser reflectate proporțional cu intensitatea câmpului magnetic produs de bobina care îl înconjoară (astfel încât să fie respectată configurația discutată în Figura 5). La final, raza reflectată este captată de o fotodioda produsă de Thorlabs care are la intrare un analizor ce se poate roti după o axa paralela cu raza laser (9). Montura fotodiodei poate fi rotită pe o axă perpendiculară pe masa optică și deplasată liniar pe direcția razei laser, pentru a putea fi aliniată cu aceasta. Polarizorul este rotit manual cu un stagiou cu micrometru. Semnalul de pe fotodioda este preluat de amplificator transimpedanta produs tot de Thorlabs (10), care

scoate un semnal în tesione proportional cu intensitatea fotocurentului preluat de pe fotodioda (9). Acesta are o banda destul de restransa la amplificarea maxima la care este folosit în mod curent, necesitand astfel o frecventa de modulare a directiei de polarizare de $\leq 1\text{kHz}$. Iesirea amplificatorului (10) este preluat apoi de placa de achiziție (11) pentru esantionare și transmitere a esantioanelor către calculator (6) printr-o conexiune seriala RS232 emulata prin USB. Sistemul mai include un microscop cu camera digitala (12) pentru căutarea și pozitionarea port-probei pe un element de interes de pe proba. Fiecare din elementele caili optice de semnal (1,3,7,8,9) sunt ajustabile manual pe verticala în mod independent unul de celalalt.

Sistemul foloseste o placa de dezvoltare Teensy 3.5 (13) pentru a genera semnalul sinusoidal de modulare a unghiului de polarizare si pentru a esantiona semnalul de pe fotodioda de detectie cu o precizie acceptabila. Placa de dezvoltare este fixata pe o montura (13) ce include reglatoare liniare de tensiune ce permit alimentarea placii de la o sursa externa, precum si conectori pentru iesirea de semnal sinusoidal. Aceasta iesire se face pe un cablu terminat intr-un conector RCA si este prevazuta un filtru trece-jos RC pasiv, cu frecventa de taiere de $\sim 1\text{kHz}$. Filtrul este necesar pentru eliminarea unor discontinuitati din semnalul de excitatie aparute la trecerea de la un esantion la altul. Deoarece iesirea convertorului digital-analog (DAC) din microcontroller nu este capabila sa alimenteze bobina modulatorului cu rezistenta mica la un curent satisfactor, semnalul sinusoidal produs de acesta este preluat de un amplificator audio de clasa D (13) alimentat dintr-o sursa separata de curent mare (14). Acesta are nevoie de rezistoare inseriate cu bobina, pentru a-i creste impedanta la o valoare adaptata cu filtrele LC de la iesirea amplificatorului. Rezistoarele sunt facute din oxid metalic (nebobinate, deci cu inductanta parazita mica), de valoare mica si putere relativ mare.

Placa Teensy include un microcontroller MK64FX512VMD12 produs de Freescale, cu un numar mare de periferice, astfel incat sa poata genera semnalul sinusoidal de modulare simultan cu esantionarea semnalului de pe fotodioda si alte prelucrari ale lui. De asemenea, microcontrollerul respectiv ruleaza la o frecventa de tact mare (120 MHz) si dispune de multa memorie pentru date si instructiuni. Generarea semnalului modulator se face cu ajutorul unui periferic de acces direct la memorie (DMA), care copiaza esantioanele unei perioade de sinusoida din memoria procesorului direct in registrul de intrare al unui periferic DAC. Esantioanele sinusoidale scalate inainte de memorare (direct in codul sursa) astfel incat extremele sa coincida cu extremele scalei DAC-ului, iar numarul lor este ales dupa numarul maxim de transferuri continue pe care le poate face DMA-ul intre 2 adrese arbitrare. Orice modificare a acestei tabele de esantioane necesita o recompilare a firmware-ului. Perioada la care este copiat un esantion nou in intrarea DACului este tactata de un periferic de tip numarator ce divizeaza frecventa de tact a procesorului la o valoare aproximativ egala cu numarul de esantioane memorate inmultit cu frecventa de modulare dorita. Esantionarea se face de catre bucla principala de executie a procesorului. Acesta citeste valoarea returnata de un convertor analog-digital (ADC) intern la care este conectata iesirea

amplificatorului transimpedanta (10). Un numar mare de aceste esantioane este mediat, media este scalata la valoarea indicata de amplificatorul (10), apoi este transformata in sir de caractere si transmisa catre calculator printr-o conexiune seriala emulata pe USB. Schema electrica a dispozitivului/demonstratorului este prezentata in figura 7. O analiza cu osciloscopul arata ca semnalul preluat de fotodioda are o diferenta de faza constanta fata de semnalul modulator, deci esantionarea acestuia din urma poate fi facuta din acelaasi moment al perioadei. Justificarea vine din faptul ca placa de achizitie poate genera semnalul modulator si porni esantionarea dupa un acelaasi tact intern.

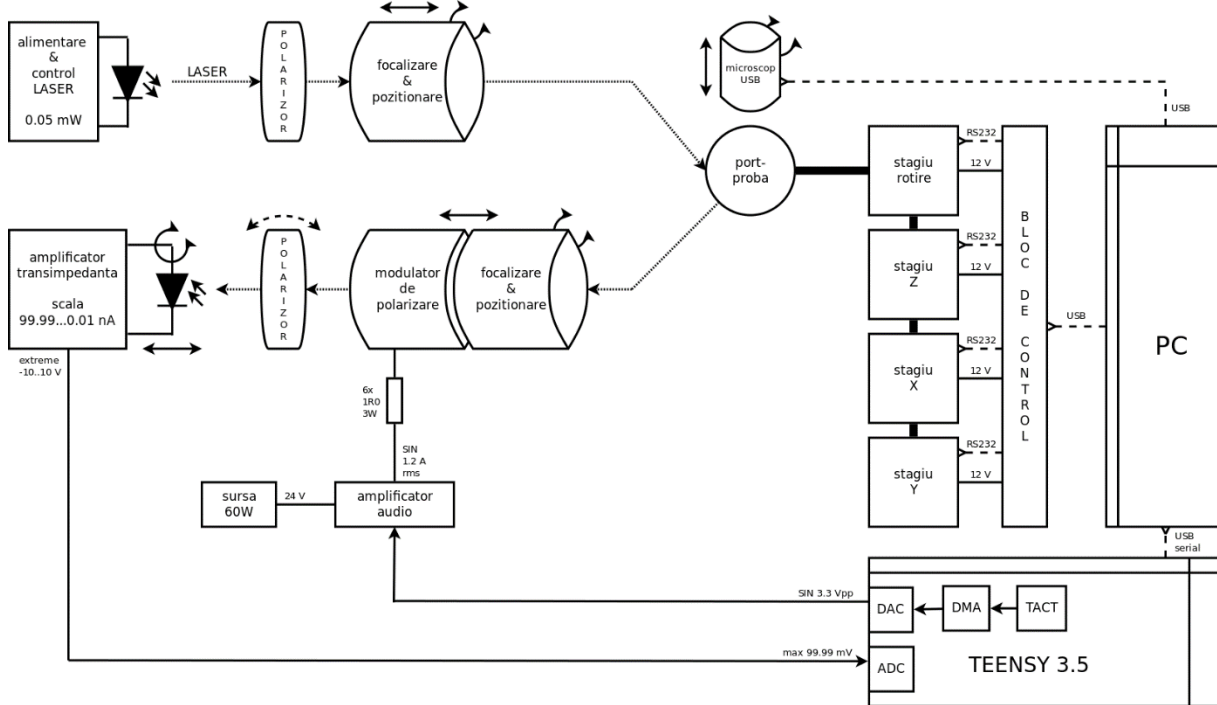


Figura 7. Schema electrica si modul de interfatare al dispozitivului la PC.

Programul de control (software-ul realizat) centralizeaza deplasarea actuatorilor pentru pozitionarea port-probei cu salvarea și conversia esantioanelor în informații utile. Acesta permite pozitionarea individuala a fiecarui actuator astfel încât să se poată face centrarea probei cu ajutorul microscopului USB. După centrare se determina suprafața dreptunghiulara de scanare cu dimensiuni date de program și centrul definit de poziția curenta a actuatorilor, care este și afisata în partea stânga-jos a ferestrei de control (Figura 8). Suprafața este discretizata ortogonal cu un pas precizat în fereastra de control, apoi, după actionarea butonului de Scan, port-proba este mutata cu centrul în fiecare punct al discretizarii de mai sus și se inregistreaza o medie a intensitatii fascicului reflectat. La final de linie, port-proba depășește puțin poziția de început, pentru a putea reveni pe ea din același sens la fiecare linie noua. Astfel se reduc erorile de aliniere între linii consecutive date de contactul imperfect dintre surubul actuatorului și lagarul sau.

Tripletul de date format din coordonatele în planul probei și intensitatea razei reflectate sunt afisate într-un tabel și salvate într-un fisier CSV la fiecare triplet nou. Intensitatile sunt adunate -intr-o

matrice bidimensională, care se afișează după achiziționarea unei linii întregi de puncte. La final se face o normalizare a nivelelor de gri din matricea respectivă, pentru a îmbunătăți contrastul vizual al imaginii finale. Secțiunea log afișează mesaje de stare și poziția curentă la care se face scanarea, odată cu linia curentă pe post de indicator de progres. Tot aici se afișează mesaje de eroare sau de poziții extreme depășite. Butonul Home mută actuatorii axelor orizontală și verticală în poziția de 0. Butonul Stop oprește procedura de scanare. Butoanele Connect și Disconnect stabilesc și opresc legătura cu blocul de control al actuatorilor. La momentul acționării butonului Scan, se face și un test dacă pozițiile extreme cerute de dimensiunile date de utilizator depășesc sau nu pozițiile extreme impuse actuatorilor.

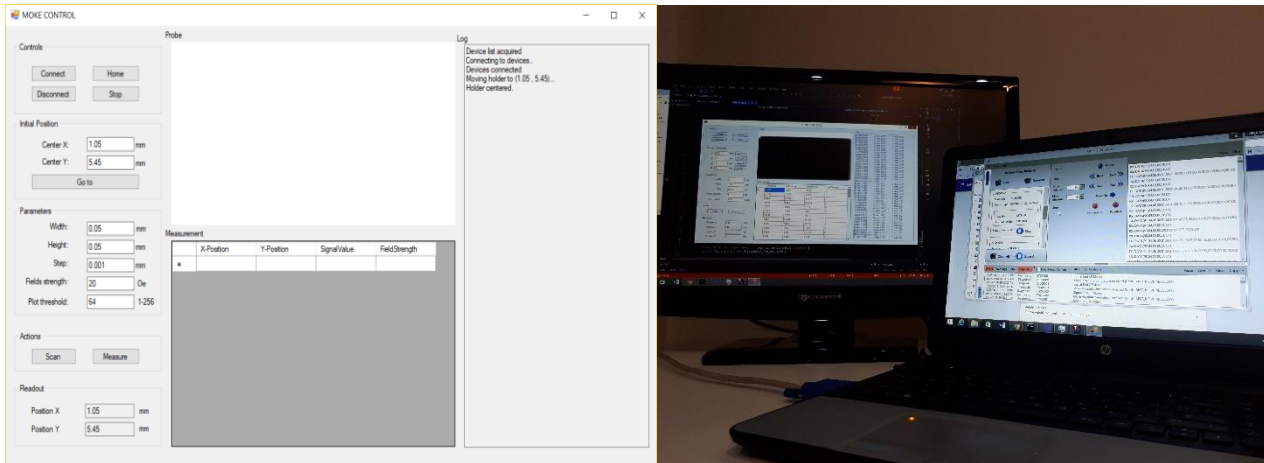


Figura 8. Interfața programului de scanare poziție și poze monitor cu programul în lucru.

Prepararea unor sisteme magnetice micro-structurate pentru testarea demonstratorului:

Sistemele de referință au constă în filme magnetice subțiri (cu grosimi de zeci de nm), nestructurate lateral (depozite pe plăcuțe patratiche de Si, cu latura de aproximativ 9 mm). Au fost avute în vedere 2 tipuri de materiale, constând în combinația de element magnetic-element nemagnetic (în speta Fe-Au sau Fe-Ag) și respectiv 2 elemente magnetice cu momente magnetice diferite cuplate antiparalel (în speta Fe-Gd). În ambele cazuri a fost variată concentrația filmului în ideea că prin aceasta va fi modificat momentul magnetic pe unitatea de formulă, implicând variația controlată a magnetizării filmului sub o variație relativ scăzută de concentrație, în condițiile păstrării constante a grosimii filmului și respectiv a caracteristicilor optice ale suprafeței. Aceste impuneri ar atrage după sine evidențierea capabilităților magnetometriei MOKE, în legătură cât mai strictă cu variația magnetizării. Toate sistemele de referință au fost obținute prin depunere tip sputtering (în regim continuu sau în radiofrecvență), într-o instalație (COVAMAX), cu 4 magnetoroane, fiind aleasă depunerea din 2 tinte.

Pentru obținerea sistemelor intermetalice sub forma de filme subțiri microstructurate (dimensiuni laterale de 6 micrometri, grosimi de zeci de nm) s-a recurs la proiectarea unor măști speciale, care să permită un proces adecvat de fotolitografie. Concret, s-au realizat 2 măști fotolitografice, una pentru electrozii de contactare (în scopul extinderii funcționalităților magnetometrului la experimente de magnetoconducție) și alta pentru structurile intermetalice bidimensionale propriu-zise. Desenul pentru măști a fost realizat cu ajutorul a 2 programe gratuite: Layout Editor, varianta de evaluare și Klayout, freeware.

Primul program s-a folosit la construcția celulelor de bază, în timp ce Klayout s-a folosit pentru asamblarea mai multor asemenea probe pentru a utiliza mai eficient spațiul disponibil pe un waffer de Si de 3in. Măștile au fost realizate, conform reprezentării de mai jos de firma DeltaMask (<http://www.deltamask.nl/frames.html>).

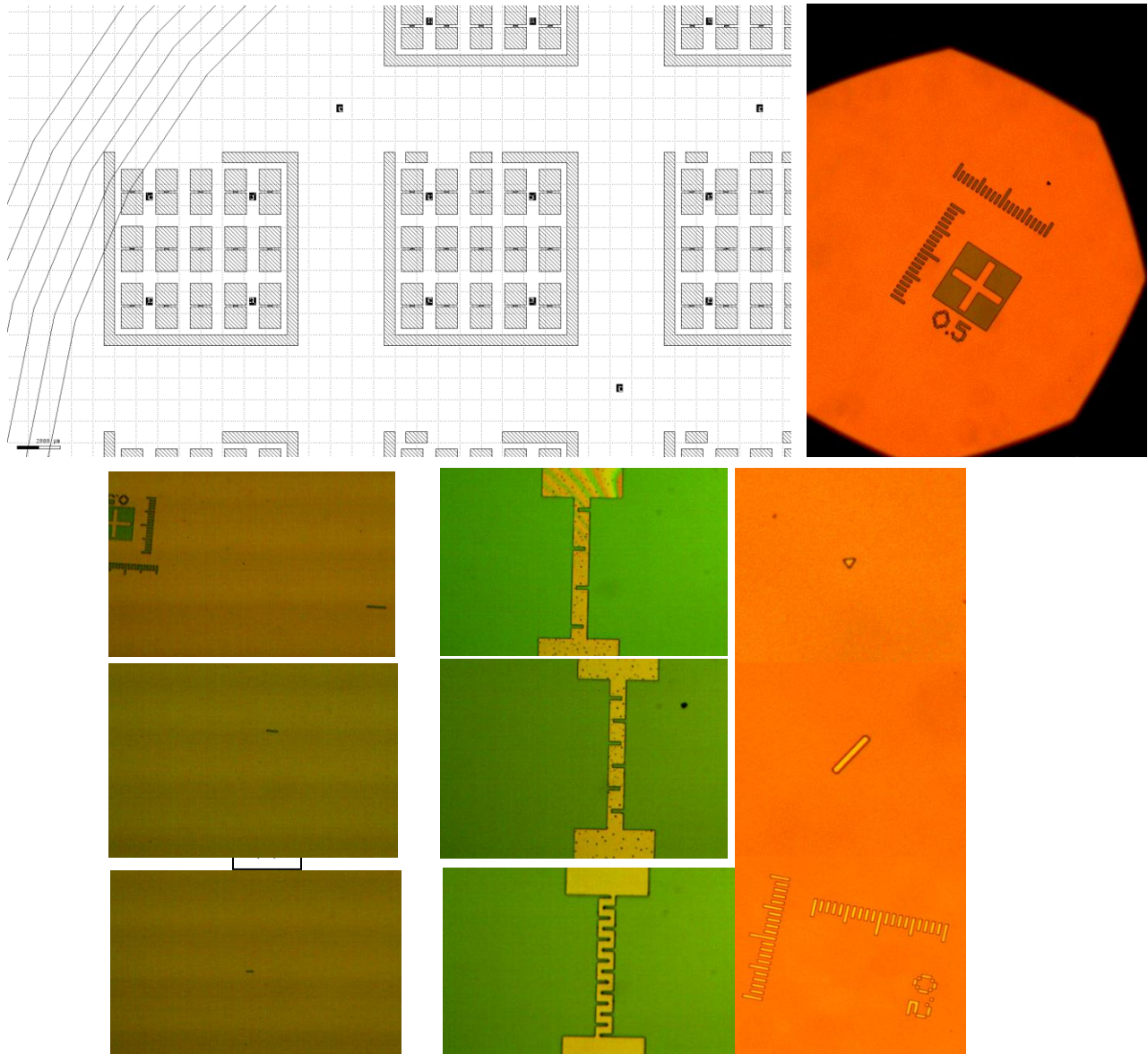


Figura 12. Micro-structuri de tip benzi cu lungimea de 35 μm (sus), 20 μm (mijloc) și 6 μm (jos) și lățimea de 5 μm și contactele corespunzătoare. În partea dreapta sunt prezentate marit următoarele structuri de Fe microstructurate: triunghi cu latura de 7 μm , dreptunghi cu lungimea de 60 μm și lățimea de 5 μm și respectiv scala gradată, fiecare liniuță având lățimea de 5 μm și lungimea de 40 și respectiv 60 μm (grosimea filmului depus de Fe fiind de 30 nm).

Ca exemplificare vizand activitatile de procesare microstructurata se prezinta modul prin care s-au preparat doua probe "template" (T1 si T2) ce contin contactele si o proba (T3) ce contine structuri de tip banda. Cele 3 probe au fost depuse pe substrat de Si (100) cu diametru de 50.8 ± 0.3 mm. Primul pas a constat in tratarea termica la 110°C pentru un minut. Dupa tratamentul termic plachetele de Si au fost racite la temperatura camerei in atmosfera de N_2 . In cazul probelor T1 si T3, fotorezistul AZ5215E a fost depus pe suprafata plachetelor prin "spin-coating" la o turatie de 6krpm pentru 60". Dupa depunerea fotorezistului, plachetele au fost supuse unui tratament termic la 110°C pentru 1'. Expunerea UV prin masca negativa s-a realizat cu o intensitate de 10 mW/cm^2 pentru 10'. Lungimea radiatiei UV a fost 365 nm. Mai departe, plachetele au fost tratate termic la 120°C pentru 2'30". Dupa racirea la temperatura camerei, plachetele au fost expuse la radiatie UV cu 10 mW/cm^2 intensitate si 365 nm lungime de unda pentru 60". Plachetele au fost pastrate in developant (MIF 726) pentru 55" la o temperatura de 19.0°C . Procesul de developare a fost incheiat prin pastrarea probelor in apa pentru 30". Proba T3 a fost obtinuta printr-o procedura similara, dar folosind o turatie de 4 krpm pentru depunerea fotorezistului prin spin-coating. Placheta a fost expusa la radiatie UV printr-o masca negativa timp de 10'. Expunerea UV fara masca a durat 60". Diversele structuri obtinute sunt prezentate in figura 12.

Prezentarea si argumentarea nivelului de maturitate tehnologica a demonstratorului.

Se considera ca a fost atins nivelul TRL4. In acest sens se va demonstra valabilitatea conceptului in raport cu functionalitatile critice si capabilitatile demonstratorului si se vor prezenta aspecte legate de testarea si optimizarea metodologiilor implementate.

In continuare va fi discutata testarea demonstratorului in raport cu capabilitatile de scanare controlata si respectiv de obtinere a semnalului util pe baza caruia sa poata fi obtinut unghiul de rotire Kerr.

Conform Figurii 6 in care s-a inlaturat electromagnetul (cu ajutorul caruia se poate aplica campul magnetic constant care sa induca magnetizarea controlata a probei) pentru a putea fi urmarit mai usor mersul razelor de lumina si procedura de scanare, lumina rosie care provine de la dispozitivul Laser printr-o fibra optica este focalizata pe proba aflata in suportul ei (dreapta), fixat pe masuta cu 4 grade de miscare (3D+rotatie) cu ajutorul condensorului optic (plan indepartat). Dupa reflexia pe proba, ea intra si este paralelizata prin sistemul optic din planul apropiat, care o trimite pe bastonul Faraday (interiorul tubului argintiu) si apoi pe fotodioda prevazuta la intrare cu un analizor rotativ (care sa poata fi fixat cu precizie in raport cu planul de polarizare al luminii emergente de pe proba. Pentru focalizare si localizare aproximativa, spotul poate fi urmarit pe microscopul fixat pe camera video conectata la calculator. Focalizarea poate fi reglata prin intermediul surubului micrometric al masutei condensorului optic, iar intensitatea radiatiei Laser poate fi variata intr-un domeniu foarte larg (s-a mers in general pe valori relative indicate pe monitorul sursei de 0.00-0.10 pana la maximum 0.90)

Pentru vizualizarea scalei gradate (considerata proba etalon pentru scanare si ulterior detectare a unghiului de rotire Kerr) prin intermediul microscopului de observare, plasat aproximativ perpendicular pe proba (plan mijlociu) s-a procedat initial la defocalizarea fascicului. Evident, observarea optica a focalizarii este dependenta de puterea din fascicul, gradul observat imbunatatindu-se semnificat la puteri cat mai mici (figura 13)

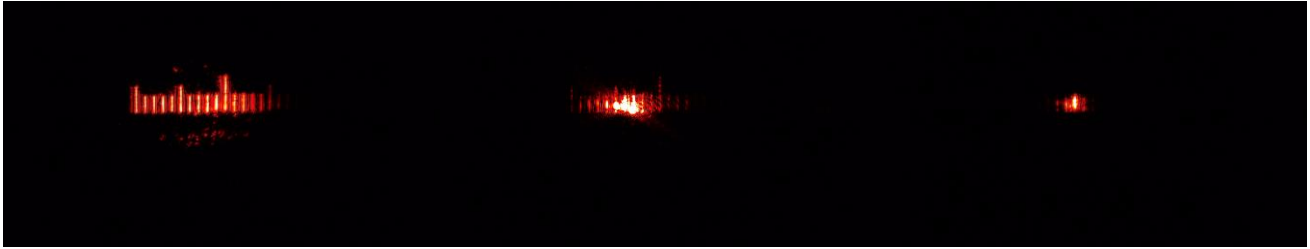


Figura 13. Gasirea scalei gradate in fasciculul nefocalizat cu $I=0.06$ (stanga) si focalizare maxima cu $I=0.06$ (mijloc) si focalizare maxima cu $I=0.01$ (dreapta)

Este evident ca pentru pozitionarea foarte precisa a fascicului laser (distributia gaussiana de intensitate in sectiune) ar trebui lucrat cu intensitate minima, ceea ce insa ar putea sa nu asigure un contrast suficient in proba scanata. Scanarea probei s-a facut initial folosindu-se logistica (hardware si software) descrisa la activitatea A.2.2. Rezultatul baleierii unei arii ce acopera cateva reticule ale scalei in conditiile unei succesiuni stanga-dreapta/ dreapta-stanga a liniilor de pixeli (cu precizia de $1 \mu\text{m}$) au fost neconcludente (variatii de intensitate alternative pe aceeasi linie reticulara), situatia imbunatatindu-se considerabil prin adaptarea softului la un algoritm de baleiere pastrand acelasi sens pe fiecare linie de pixeli (toate imaginile sunt prezentate in figura 14)

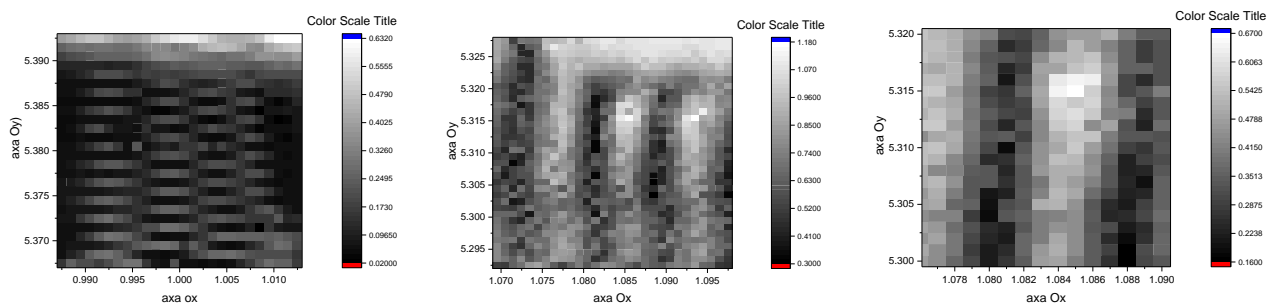


Figura 14. Rezultatele scanrii a 3 reticule ($30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$) in sensuri opuse de baleiere (stanga), respectiv in acelasi sens de baleiere (mijloc) si rezultate ale scanrii a 2 reticule ($20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$) in acelasi sens de baleiere.

De mentionat ca prin folosirea acestui procedeu de scanare se urmareste fie pozitionarea controlata a fascicului focalizat pe micro-structura magnetica de interes, urmand ca apoi sa fie obtinuta dependenta unghiului K_{rtt} in functie de campul magnetic static aplicat asupra probei (ciclu de histerezis), fie impunerea unui domeniu de scanare cu detectarea unghiului Kerr in fiecare pozitie a domeniului (mapare de domenii magnetice).

In continuare se va demonstra capabilitatea dispozitivului de determinare a unghiului Kerr prin evidentierea formarii si evolutiei corespunzatoare a semnalului dat de modulatorul Faraday. Conform principiului de masura evidentiat la activitatea 2.1, specificitatea semnalului dat de modulatorul Faraday ar trebui sa corespunda urmatoarelor situatii: (i) la plasarea analizorului in pozitie perpendiculara pe

directia de polarizare a radiatiei reflectate de proba ar trebui sa se obtina un semnal de frecventa dubla fata de frecventa campului alternativ B din lungul bastonului de sticla (frecventa egala cu cea a curentului de excitare pe bobina in care este plasat bastonul), ambele amplitudini corespunzatoare celor 2 oscilatii integrate in oscilatia excitatoare trebuind sa fie egale, (ii) la rotirea analizorului cu unghiul β fata de aceasta pozitie de referinta, cele 2 oscilatii integrate trebuie sa prezinte amplitudini inegale, dezechilibrul acestora crescand continuu astfel incat la atingerea unghiului β una din amplitudini devine nula iar frecventa semnalului devine aceeași cu a semnalului de excitare.

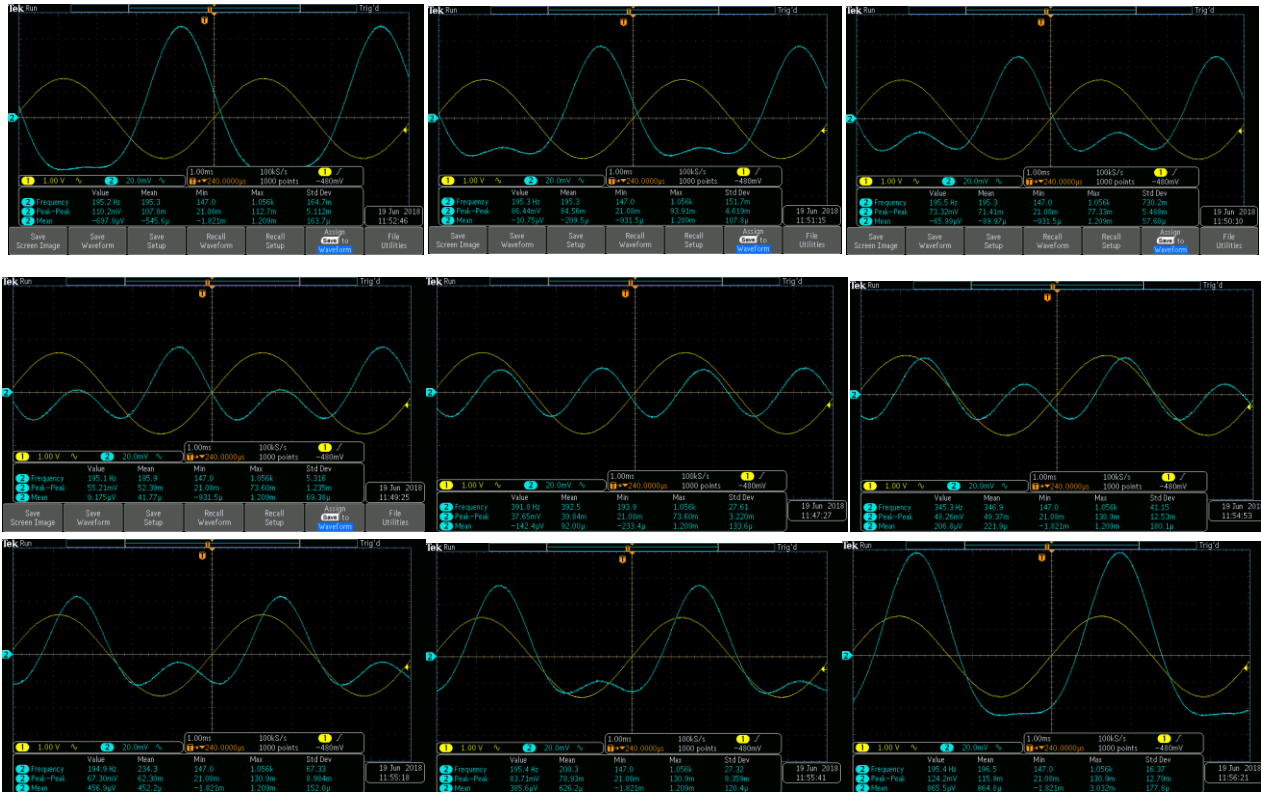


Figura 15. Evolutia semnalelor de pe fotodioda (spre comparatie este dat si semnalul de curent excitator pe bobina modulatorului Faraday) la rotirea analizorului fata de directia perpendiculara pe planul de polarizare, cu urmatoarele unghiuri (de la stanga la dreapta si de sus in jos): 150', 90', 60', 30' 0', -30', -60', -90', -150'.

Rotatia intr-un sens sau altul este cea care determina care amplitudine scade. Ca urmare, procedura de evidentiere a rotirii Kerr este urmatoarea: (i) se pleaca de la o rotire mare a analizorului fata de planul perpendicular pe directia de polarizare, caz in care in fotodioda se obtine un semnal cu frecventa semnalului de excitare al bobinei, (ii) se roteste analizorul inspre pozitia perpendiculara pe planul de polarizare, caz in care se incepe evidentierea semnalului de frecventa dubla cu una din oscilatii de amplitudine mult crescuta fata de cealalta, (iii) se trece prin pozitia analizor perpendicular pe directia de polarizare, caz in care semnalele de frecventa dubla au aceiasi amplitudine, (iv) se continua rotatia analizorului in acelasi sens, caz in care cele 2 amplitudini de dezechilibreaza in sens opus si se ajunge

iarasi la o rotire as analizorului care depaseste unghiul $-\beta$, caz in care se revine la oscilatia de frecventa de baza. Toata aceasta evolutie este reflectata de succesiunea de imagini luate pe osciloscop (semnalul de pe fotodioda si spre comparatie semnalul de excitare), pentru diverse unghiuri de rotire la analizorului), prezentate in figura 15. Pe baza datelor de mai sus se poate estima un unghi β (amplitudinea rotirii induse de modulator) de $120'$.

Pentru a demonstra sensibilitatea unghiului de rotire Kerr la modificarea magnetizarii unei structuri micrometrice, in figura 16 se prezinta semnalul obtinut cu fasciculul focalizat pe o linie reticulara a scalei, in lipsa aplicarii unui camp magnetic si respectiv in prezenta aplicarii unui camp magnetic (prin apropierea de structura a unui magnet permanent cu inductia magnetica la suprafata de 100 mT). Se observa clar o dezechilibrare suplimentara a semnalului de cateva zecimi de mV, in cel de-al doilea caz, diferenta ce poate fi usor transformata in unghi de rotire pe baza algoritmului descris la activitatea A2.1.

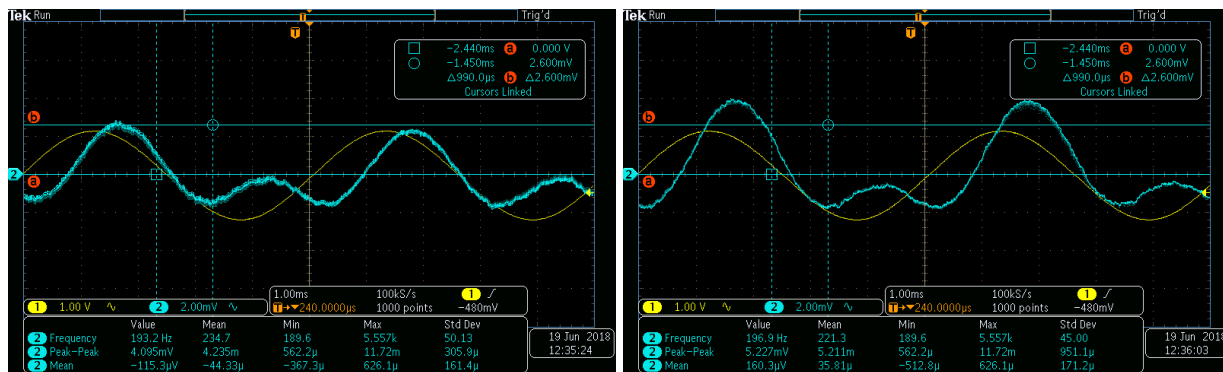


Figura 16. Forma semnalului pe fotodioda, generat la reflexia fasciculului focalizat pe o structura micrometrica magnetica in lipsa unui camp magnetic (stanga) si respectiv in prezenta unui camp magnetic de cateva zeci de mT.

Gradul de rotire Kerr a unui film de Fe bidimensional (cu grosime de 20 nm) la atingerea magnetizarii de saturatie (demonstrat pe un dispozitiv MOKE alternativ) este de ordinul minutului. Cum pentru un astfel de material soft magnetic saturatia se atinge deja in zeci de mT, o rotatie de ordinul minutului va corespunde unei dezechilibrari de ordinul sutelor de μ V, ceea ce permite o precizie a dispozitivului (precizie in tensiune de ordinul μ V) ded ordinul sutimii de minut (respectiv zecimii de mdeg).

Modul de atribuire si exploatare de catre parteneri a drepturilor de proprietate asupra rezultatelor proiectului.

Modul de atribuire si exploatare a drepturilor de proprietate asupra rezultatelor proiectului se bazeaza pe urmatoarele principii recunoscute la nivel European: (i) fiecare partener a mentionat la inceputul proiectului drepturile de proprietate intelectuala detinute, de interes pentru indeplinirea obiectivelor proiectului (majoritatea cunoscutintelor anterioare si anumite metodologii fiind publicate in reviste stiintifice de catre membrii echipei), (ii) fiecare partener isi poate cere drepturile de proprietate

intelectuala asupra acelor aspecte dezvoltate in colaborare in cursul proiectului. Ca urmare, proprietatea intelectuala va intra in posesia tuturor partenerilor care au contribuit la realizarea unui produs/metodologie brevetabila (parteneri in proiect sau terti), proportional cu contributia adusa de fiecare partener in atingerea obiectivului, conform legii 64/1991, republicata in 2007. In cazul de fata, procedeul se refera la brevetarea de metodologii/componente cu functionalitati diferite/demonstrator, nefiind inca definitivata hotararea brevetarii unice a dispozitivului in totalitate sau pe parti/metodologii distincte. In cazul lucrarilor stiintifice, publicate pana in acest moment numai cu referire la sistemele magnetice preparate in vederea demonstratii capabilitatilor dispozitivului, listele de autori au cuprins strict personalul care a contribuit la realizarea lor.

Impactul rezultatelor obtinute.

Din punctul de vedere al impactului asupra activitatii de diseminare si al prestigiului stiintific, rezultatele obtinute in aceasta etapa au facut obiectul a 7 prezentari la conferinte internationale, 3 articole ISI si 2 articole ISI in curs de evaluare.

In afara activitatii de diseminare, au fost obtinute diferite produse sub forma de: filme subtiri cu diverse proprietati magnetice si microstructuri magnetice cu grosimi nanometrice, componente electronice de comanda, prelucrare a semnalelor si interfatare, softuri de comanda si prelucrare a semnalelor si respectiv un demonstrator constand intr-un dispozitiv modular si integrat vizand studiul sistemelor magnetice microstructurate. 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, proiectat si realizat in cadrul acestui proiect, comparativ cu alte sisteme MOKE comerciale actuale rezida din: (i) combinatia de precizie, viteza si fiabilitate a msuratorilor 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. Dispozitivul va fi utilizat in special pentru lucrarile de cercetare stiintifica fundamental si aplicativa ale partenerilor in proiect (implementare la realizator).