



EIROPAS SAVIENĪBA

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



EIROPAS REĢIONĀLĀS
ATTĪSTĪBAS FONDS

Projekts (vienošanās Nr. 2010/0242/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/036)

„Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai izmantojot nanostrukturētu atomārās gāzes vidi”

Aprobēta jauna tehnoloģija, atskaite par testa rezultātiem.

Aktivitāte 3.

„Jaunas tehnoloģijas aprobācija”

Aktivitātes periods: 01.01.2013.-31.12.2013.

Apstiprinu:

Vjačeslavs Kaščejevs
(Projekta padomes priekšsēdētājs)

Apstiprinu:

Ruvins Ferbers
(Zinātniskais vadītājs)

Rīga, 2014.g. janvāris

Aktivitāte 3: Jaunas tehnoloģijas aprobācija

Ievads

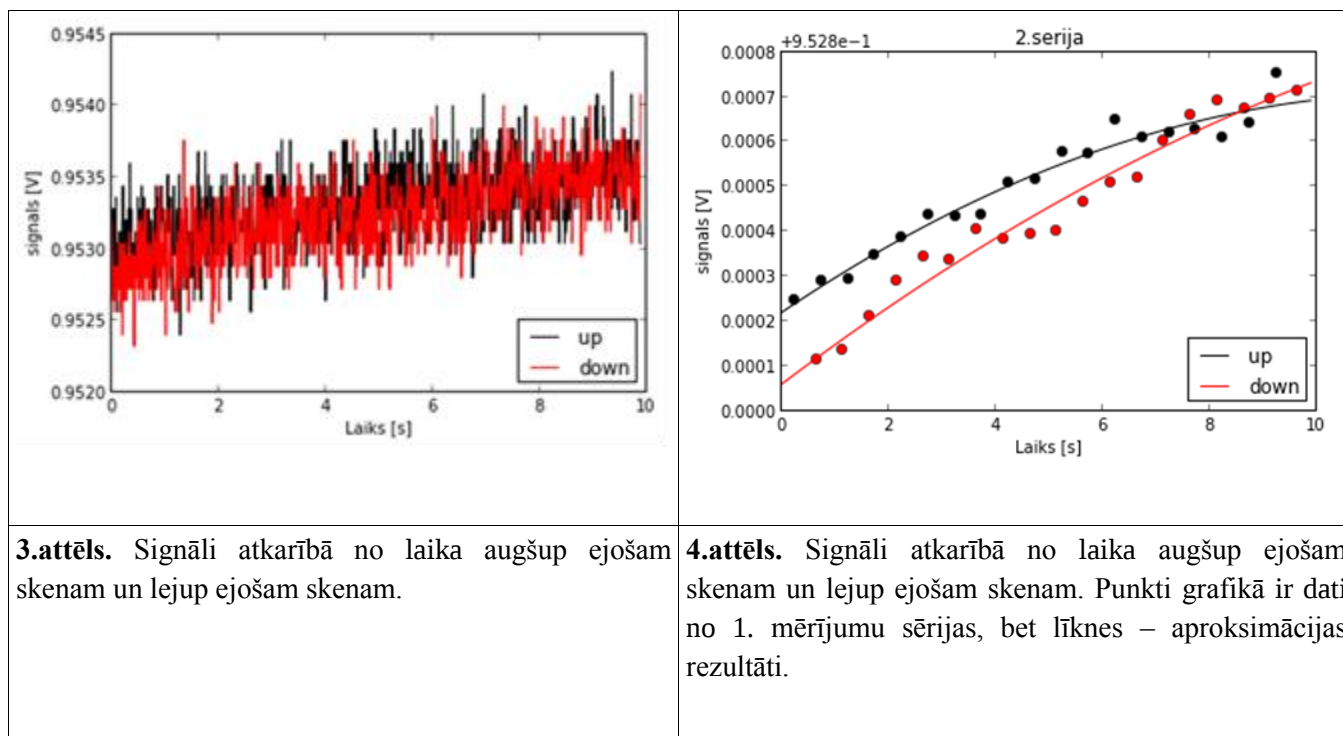
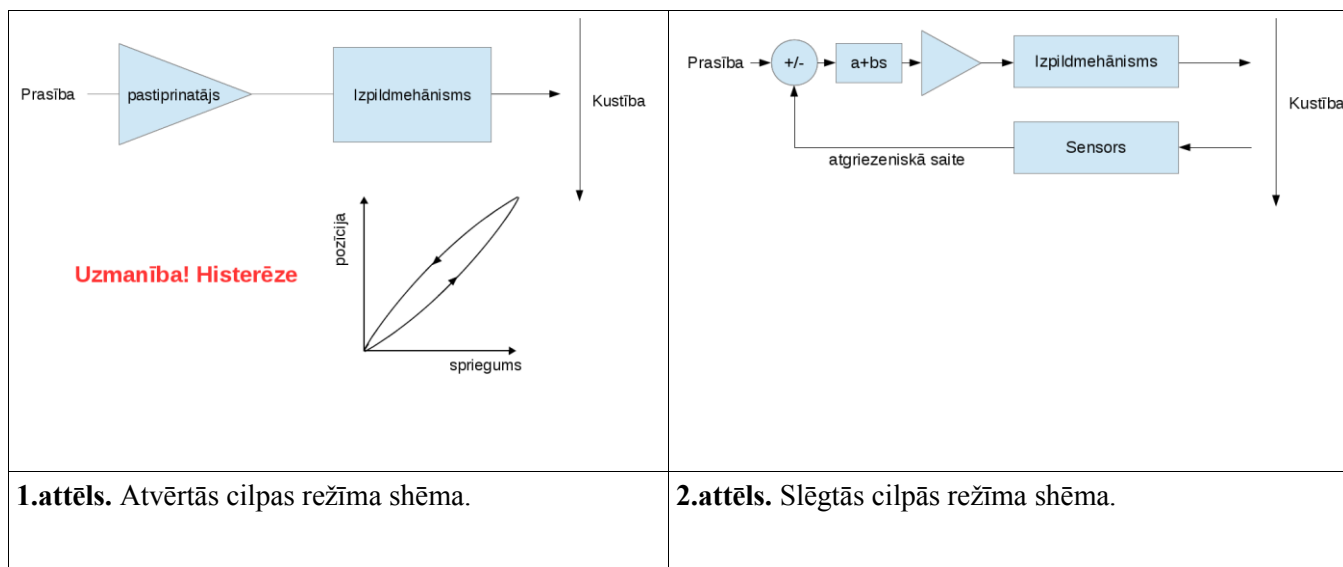
Projekta “Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai izmantojot nanostrukturētu atomārās gāzes vidi” (Nr. 2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/036) ietvaros izstrādātā magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanas prototipa iekārta ir sarežģīta un ietver dažādas apakšsistēmas, kuras bija nepieciešamas testēt un aprobēt atsevišķi, kā piemēram, termostabilizācijas sistēmu un magnētiskā lauka ekranēšanas moduli. Starp svarīgākajām apakšsistēmām jāpiemin nanopozicionēšanas galdiņš, lāzera stabilizēšanas iekārta un absorbcijas signālu mērīšanas iekārta. Katrai apakšsistēmai tika veikta virkne mērījumu, lai pārlicinātos, ka apakšsistēma strādā tā, lai kopumā nodrošinātu nepieciešamo mērījumu precizitāti un atkārtojamību.

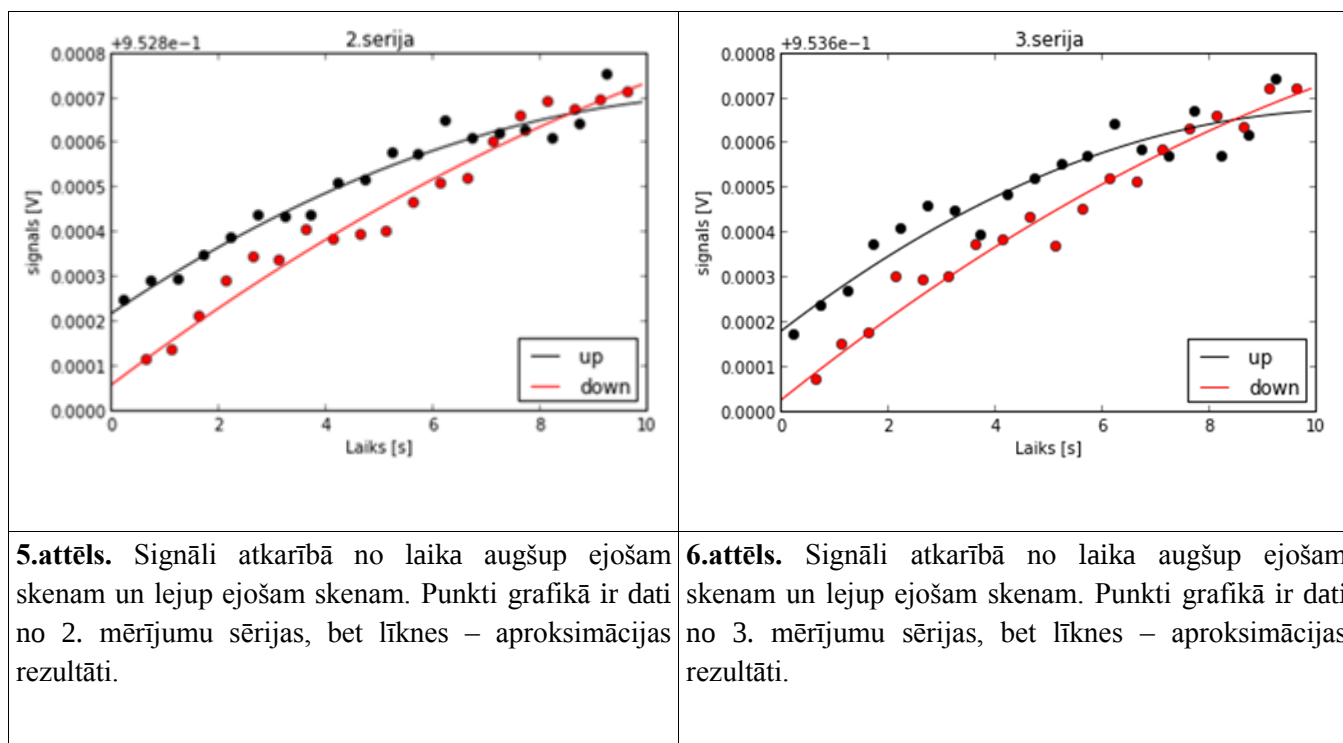
Tika izvērtēta arī vairāku citu procesu un efektu iespējamā loma, kā arī iespējas tos nākotnē izmantot mērāmā magnētiskā lauka diapazona paplašināšanai. Pie šādiem procesiem pieder magnetoptiskie efekti divatomu molekulās (KCs, RbCs u.c.), tajā skaitā mijiedarbība starp paramagnētiskiem ($^{1,3}\Pi$) un diamagnētiskiem ($^1\Sigma$) stāvokļiem, atomu un dimēru sadursmes un koherences relaksācija tajos.

Tika veikti daudzi magnētiskā lauka un tā gradienta mērījumi, lai raksturotu prototipa jūtību un rezultātu atkārtojamību.

Nanopozicionēšanas galdiņš

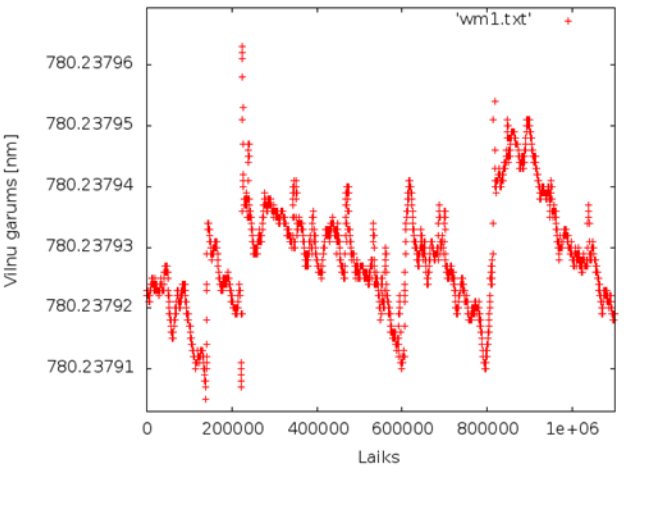
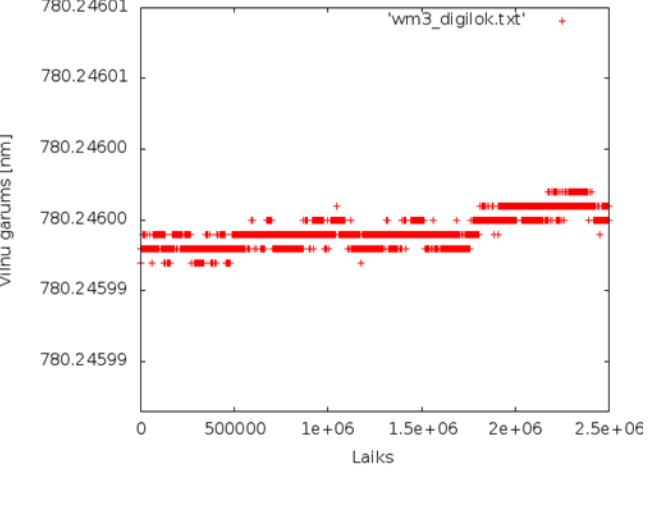
Iekārtas jūtīgais elements - nanoizmēru šūna, tiek nostiprināta uz nanopozicionēšanas galdiņa (MAX341/M no “Thorlabs, Inc.”). Tā kā gradients raksturo magnētiskā lauka vērtības izmaiņu telpā, bija nepieciešams mērīt magnētiskā lauka vērtību vairākās precīzi zināmās pozīcijās. Pozīciju var precīzi mainīt izmantojot pjezo elementu, kas ir kristāls, kura dimensijas mainās atkarībā no elektriskā lauka. Lai nodrošinātu precīzu pozīciju, pjezo elementa darbībai ir vismaz divi iespējamie darbības režīmi: atvērtās cilpas režīms (sk. 1.attēlā) un slēgtās cilpas režīms (sk. 2.attēlā). Atvērtās cilpas darbības režīma pamatā izmantots princips, ka pjezo kristāla dimensija ir proporcionāla pieliktajam elektriskajam laukam. Diemžēl, reālā sistēmā tas neizpildās vienmēr, un var gadīties, ka ir novērojama histerēze, kur pozīcija pie noteiktas elektriskā lauka vērtības ir atkarīga no tā, kurā virzienā pjezo kristāls kustas. Precīzāks ir slēgtās cilpas režīms, kur pozīcija tiek pārbaudīta ar atsevišķu sensoru, un sensora informācija tiek izmantota, lai koriģētu pozīciju. Prototipā izmantotais galdiņš MAX341/M strādā slēgtās cilpas režīmā, un tika pārbaudīts, vai ir novērojama histerēze un cik liela tā ir. Tika uzņemti vairāki skenī un reģistrēti signāli, galdiņu pārvietojot vienā vai otrā virzienā (attiecīgi - pieaugošais vai krītošs spriegums uz pjezo kristāla.) Iegūtie rezultāti ir parādīti 3. - 6. attēlā. Histerēze nav novērojama 3.attēlā, kur parādīti neapstrādāti dati. Pie apstrādes vidējojot datus, parādās neliela histerēzes cilpa. Tomēr atšķirība starp signāliem, pārvietojot galdiņu vienā vai otrajā virzienā, nav pietiekoši nozīmīga, lai traucētu magnētiskā lauka un tā gradienta noteikšanu ar nepieciešamo precizitāti.





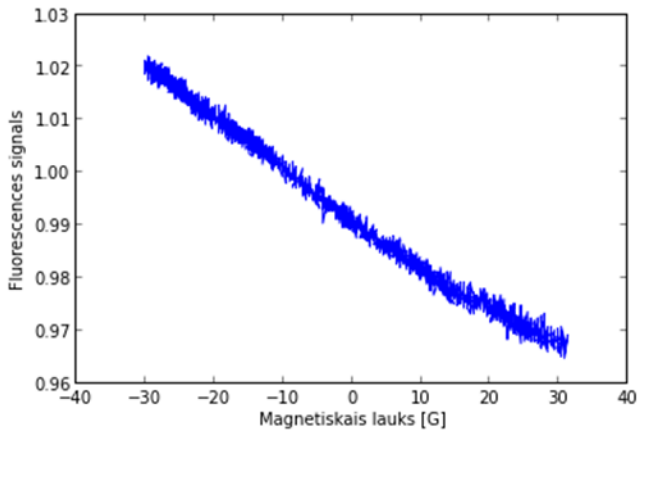
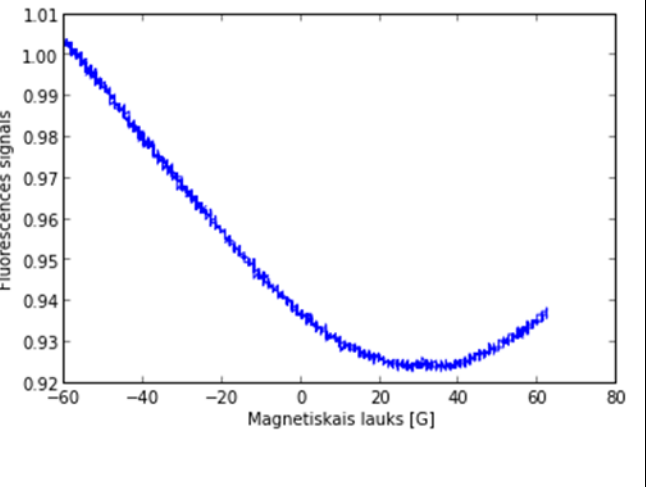
Lāzera stabilizēšana

Lai nodrošinātu precīzus mērījumu rezultātus, ir ļoti svarīga lāzera stabilitāte, jo tiek novēroti un reģistrēti absorbcijas signāli, un absorbcijas daudzums ir atkarīgs no lāzera frekvences vai viļņa garuma. Lāzera izveidē ir veikti dažādi pasākumi, lai nodrošinātu stabilu darbību. Piemēram, lāzera diodei tiek pievienots ārējais režģis, lai veidotu rezonatoru, un rezonatora garums tiek stabilizēts, aktīvi stabilizējot lāzera temperatūru. Elektroniskās shēmas nodrošina stabilu strāvu, tomēr lāzera viļņa garums mēdz laikā mainīties. Lai palielinātu lāzera stabilitāti, daļa no lāzera starojuma tika laista absorbcijas šūnā, kas bija ekranēta no ārējiem magnētiskajiem laukiem. Tur tika ierosināts piesātināšanas absorbcijas spektrs, kam ir spektrālās līnijas pie precīzi zināmām viļņa garuma vērtībām. Papildus tika izmantota īpaša elektroniskā iekārta (*Digilok* no “Toptica GmbH”), kas aktīvi stabilizē lāzera viļņu garumu, izmantojot informāciju no piesātināšanas absorbcijas spektra. Kad *Digilok* iekārta netiek izmantota, un lāzers stabilizēts tikai ar aktīvu temperatūras un strāvas stabilizāciju, redzams, ka viļņa garums svārstījās neparedzami (sk. 7. attēlā). Svārstību amplitūda pārsniedza 0,05 pm, bet ilgākā laikā sagaidāmas arī lielākas svārstības. Izmantojot *Digilok* iekārtu (sk. 8. attēlā), svārstību līmenis ir mazāks par 0,01 pm, un straujas izmaiņas vairs nenotiek.

	
7. attēls. Lāzera viļņu garuma izmaiņa laikā (sekundēs), stabilizējot tikai temperatūru un strāvu.	8. attēls. Lāzera viļņu garuma izmaiņa laikā (sekundēs) gadījumā, kad lāzers tiek stabilizēts ar Digilok sistēmu.

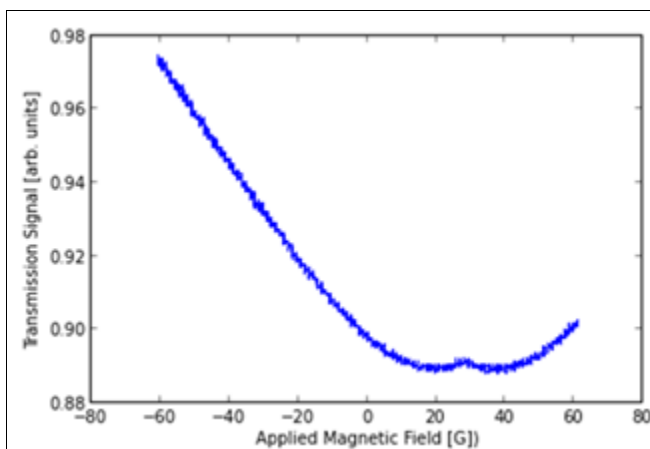
Troksnis

Ir daudzi fizikāli efekti, kas var veidot troksni absorbcijas šūnas sistēmā. Troksni var izraisīt mehāniskās svārstības, piemēram, no kāda rotējoša ventilatora vai no kāda gar laboratoriju braucoša transporta līdzekļa. Tāpat iespējams elektroniskais troksnis no pašas sistēmas, vai arī no elektromagnētiskajiem viļņiem apkārtņē vai strāvās piegādē. Iepējamās arī statistiskās fluktuācijas, kas ir saistītas ar reģistrēto fotonu skaitli. Divas līknes ar atšķirīgiem trokšņu līmeņiem ir redzamas 9. attēlā un 10. attēlā. Var secināt, ka troksnis ir atšķirīgs, kas nozīmē, ka sistēmu ietekmē dažādi iekšēji un ārēji trokšņu avoti. Tomēr trokšņu līmenis ir pietiekoši mazs, ar nelielu reģistrēšanas laiku, trokšņu ietekmi var samazināt, vidējot reģistrētos datus.

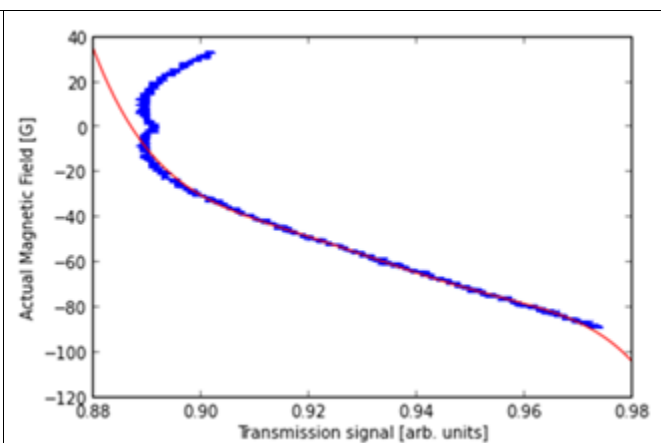
	
9. attēls. Signāla atkarība no magnētiskā lauka.	10. attēls. Signāla atkarība no magnētiskā lauka.

Magnētiskā lauka noteikšana

Lai noteiktu magnētiskā lauka vērtību, ir jāzina attiecība starp to un absorbcijas signāla vērtību. Sasniedzamais magnētiskā lauka jutīgums ir atkarīgs no tā, cik signāla vērtība mainās līdz ar magnētisko lauku. Magnētisko lauku nevar izmērīt, ja nav novērojamas nekādas izmaiņas signāla vērtībā, mainot magnētisko lauku. Tāpēc bija nepieciešams mērīt absorbcijas signāla atkarību no magnētiskā lauka, lai pārbaudītu, vai izmaiņas ir pietiekoši pamanāmas. Kalibrācijas līkni, kur absorbcijas signāls ir attēlots atkarībā no magnētiskā lauka, var redzēt 11. attēlā. Zināmais magnētiskais lauks tika radīts ar indukcijas spoļu palīdzību, salīdzinot iegūto spektru ar iepriekš izmērītajiem datiem. Apgrieztā kalibrācija, kur magnētiskais lauks ir attēlots uz y-ass, bet signāls - uz x-ass, ir redzama 12. attēlā. Rezultāti liecina par to, ka ir novērojama skaidri pamanāma atkarība virs trokšņu līmeņa, gan 11. attēlā, gan 12. attēlā, un tas tiek izmantots, lai iegūtu nezināmo magnētisko lauku no novērotā signāla.

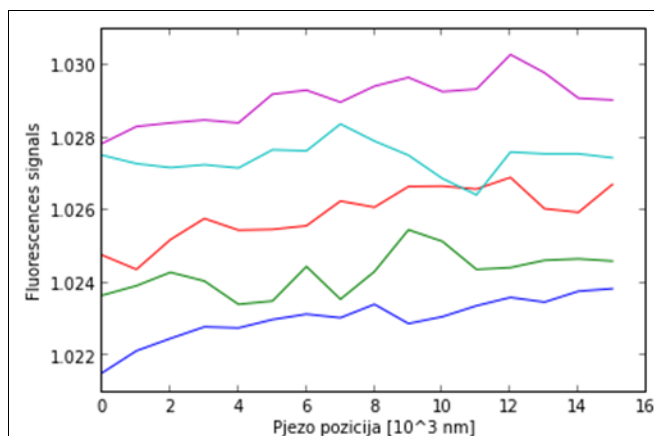


11.attēls. Signāls atkarībā no magnētiskā lauka.

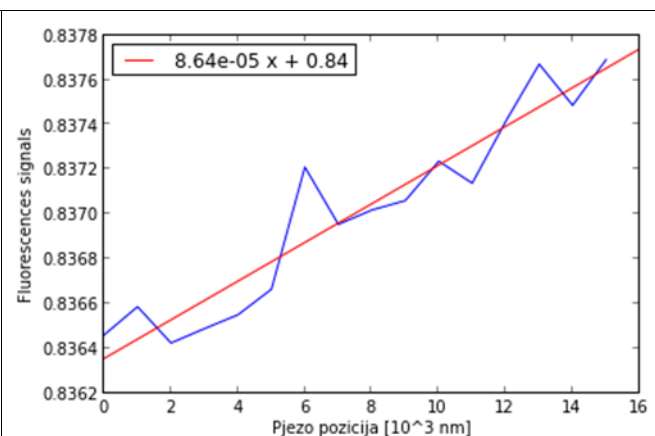


12.attēls. Magnētiskais lauks atkarībā no signāla vērtības.

Pēc tam ir jāpārbauda signāla stabilitāte. Bez lāzera stabilitātes, signāla intensitāte var mainīties, piemēram, mainot temperatūra vai lāzera jaudu. Līdz ar to, signāla stabilitātes mērījums ir stipri saistīts ar temperatūras stabilitāti un dod tam augšējo robežojumu. Tika uzņemti pieci atsevišķi skeni, skenējot pjezo galdiņu un reģistrējot absorbcijas signālu. Kā redzams 13. attēlā, kopīgā signāla intensitāte mainās starp skeniem, kaut arī līknes slīpums nemainās. Signāla intensitātes izmaiņas ietekmē magnētiskā lauka vērtības noteikšanu, bet signāla slīpuma izmaiņas – magnētiskā lauka gradienta noteikšanu. Kopīgās signāla intensitātes izmaiņas ir jāvērtē kalibrācijas kontekstā. Salīdzinot signāla intensitātes izmaiņas diapazonu ar kalibrācijas diapazonu 11. attēlā, var redzēt, ka izmaiņas ir mazākas par kopīgajām signāla izmaiņām magnētiskā lauka diapazonā. Tas nozīmē, ka neskatoties uz signāla intensitātes svārstībām, ir iespējams veikt magnētiskā lauka mērījumu, uzlabojot tā precizitāti vidējot vairāku skenu signālus, kā tas ir veikts 14. attēlā.



13.attēls. Eksperimentālie signāli atkarībā no pjezo kristāla pozīcijas pieciem skeniem.



14.attēls. Vidējais signāls atkarībā no pjezo kristāla pozīcijas. Zilā līkne ir eksperimentālie dati, bet sarkanā līkne – aproksimācija.

Pēc tam, kad ir iegūts ticams absorbcijas signāls, ir jāizmanto kalibrācijas līkne, lai noteiktu magnētisko lauku un tā gradientu. Precizitāti var būtiski uzlabot izmantojot nevis atsevišķus punktus, bet pilnās līknes atkarību no pjezo kristāla pozīcijas. No šāda veida līknēm var arī uzreiz iegūt gradienta vērtību. Tika radīts nehomogēns magnētiskais lauks (lauks ar gradientu) izmantojot divus neodīma magnētu diskus, kuri bija novietoti ap nanoizmēru šūnu, ar pretēji vērstiem poliem. Rezultāti no 3 skenu analīzēm ir parādīti 1. tabulā. Pirmajā ailē ir dota katra skena piedzīšanas parametri, no kuriem tiek izrēķinātas magnētiskā lauka un tā gradienta vērtības pēc formulām, kas dotas 1. rindā. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka magnētiskā lauka precizitāte pie 74 G lauka ir +/- 0,3 G, jeb 0,4%. Precizitāte, ar kuru var noteikt magnētiskā lauka gradientu, ir apmēram 2 $\mu\text{G}/\text{nm}$.

1.tabula. Magnētiskā lauka un tā gradienta mērījumu atkārtojamība.

	Magnētiskais lauks $B = a + bx + cx^2$	Gradients $dB/dx = b + 2x$
1. skens a = 73.7899 +/- 0.007954 b = 0.0379491 +/- 0.002823 c = -0.000686533 +/- 0.0001915	73,89 G	37,9 $\mu\text{G/nm}$
2. skens a = 74.0843 +/- 0.008557 b = 0.0398731 +/- 0.003036 c = -0.000821826 +/- 0.0002058	74,1 G	39,8 $\mu\text{G/nm}$
3. skens a = 74.3552 +/- 0.009503 b = 0.0418225 +/- 0.003372 c = -0.000906786 +/- 0.00023	74,4 G	41,8 $\mu\text{G/nm}$

Kopsavilkums

Testa rezultāti liecina par to, ka prototipa iekārta ir spējīga mērīt magnētisko lauku diapazonā no apmēram 10 G līdz 100 G ar precizitāti līdz 0,4%, kad lauka vērtība ir ap 74 G. Izmantojot stiprāku strāvas avotu vai spoles, paredzama iespēja mērīt vēl lielākas magnētiskā lauka vērtības. Tika noteiktas magnētiskā lauka gradienta vērtības ap dažiem desmitiem mikrogausiem uz nanometru ar precizitāti līdz 2 $\mu\text{G/nm}$. Testa rezultāti liecina, ka izstrādātā un izmantotā lāzera stabilizēšanas sistēma nodrošina ļoti stabilu lāzera frekvenci. Nanopozicionēšanas galdiņa kustības bija pietiekoši atkārtojamas, trokšņu un signālu svārstību līmeņi netraucēja sasniegt vajadzīgo precizitāti pie dotās kalibrācijas līknes. Tātad, šie prezentētie testa rezultāti parāda, ka iekārta uzskatāma par aprobētu.