

**Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai izmantojot
nanostrukturētu atomārās gāzes vidi
(Nr. 2010/0242/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/036)**

Projekta ietvaros paveiktais no 01.05.2012 līdz 31.10.2012.

Ievads

Atskaites periodā tika pabeigta laboratorijas iekārtas izveide, un ar to tika uzņemts liels datu klāsts optimālo eksperimentālo apstākļu piemeklēšanai. Pateicoties lielam eksperimentālo datu krājumam intensīvi turpinājās darbs pie teorētiskā modeļa pilnveidošanas. Vienlaicīgi tika strādāts pie iekārtas izveidošanas magnētiskā lauka gradienta mērīšanai un uzsākts darbs pie prototipa iekārtas izveidošanas.

1. Pētniecība**1.1. Laboratorijas iekārtas izveidošana, testēšana un optimālo eksperimentālo apstākļu piemeklēšana**

Lai piemeklētu optimālos eksperimenta apstākļus, atskaites periodā tika veiktas modifikācijas un uzlabojumi laboratorijas iekārtā. Viena no problēmām bija laboratorijas iekārtas zemējuma nevienmērīgums, un tas izraisīja trokšņus. Lai novērstu šādus trokšņus, veikti būtiski uzlabojumi mēraparātu pieslēgumu shēmās ar nolūku filtrēt trokšņus, kā arī iebūvēti atsaistoši pastiprinātāji, kuriem ir atsevišķi zemējumi gan ieeja, gan izejā, tādējādi trokšņi tika ievērojami samazināti.

Laboratorijas iekārtā tika veiktas arī izmaiņas, kas ļāva laist lāzera starojumu patvaļīgā leņķī starp magnētiskā lauka vektoru un gaismas polarizācijas vektoru (sk. 1.attēlā.), līdz ar to bija iespējams ierosināt pārejas ar $\Delta m=1$, kur m ir atomu leņķiskā momenta z -komponente. Iepriekš bija iespējams ierosināt tikai pārejas ar $\Delta m=2$. Izmaiņas pavēra jaunas iespējas eksperimentiem ar no magnētiskā lauka atkarīgiem signāliem (tālāk aprakstīti eksperimenti ar $\Delta m=1$). Eksperimentālā iekārta ir parādīta 2.attēlā. Rezultātā izdevās nodrošināt vēlamo precizitāti magnētisko signālu mērījumiem.

Būtiska eksperimenta parametru uzlabošana tika veikta, piemeklējot optimālos lāzera starojuma avotus. Tika aprobēti un testēti sinerģijā ar citu projektu iegādātie augstas kvalitātes lāzeri:

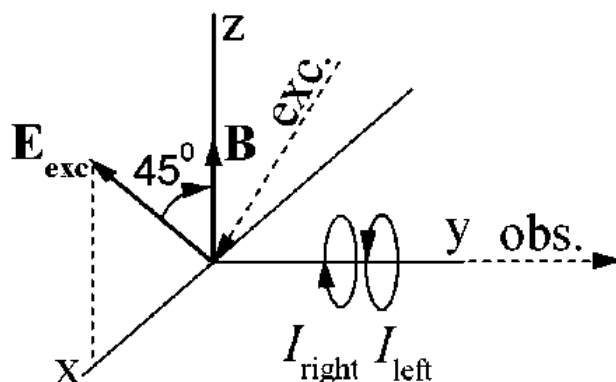
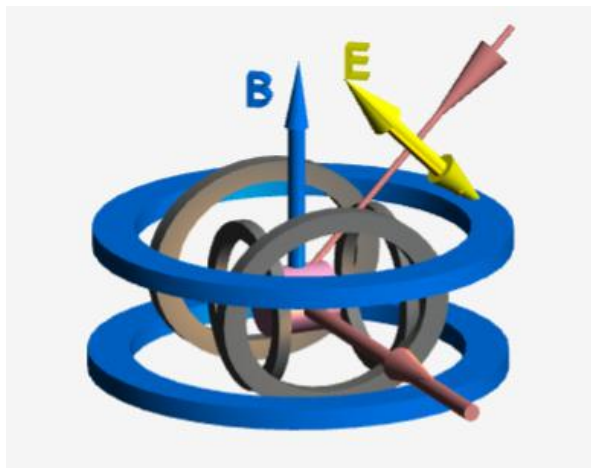
- DFB lāzers Cs D1 līnijai
- DFB lāzers Cs D2 līnijai
- ECDL lāzers Rb D2, K D1 un K D2 līnijām
- ECDL lāzers 1027-1080 nm ierosmei
- ECDL lāzers 510-513 nm ierosmei
- ECDL lāzers 512-515 nm ierosmei
- ECDL lāzers molekulu ierosmei pie 780 nm
- ECDL lāzers molekulu ierosmei pie 785 nm
- cietvielu lāzers NV centru ierosmei (532 nm).

Īpaši nozīmīgi šī projekta izpildē būs divi DFB lāzeri cēzija D1 un D2 līniju ierosmei, jo tie tiks izmantoti prototipa izstrādē cēzija ierosmei nanoizmēra šūnā.

Lai nodrošinātu laboratorijas lauka kontroli, pēc veiksmīga iepirkuma konkursa noslēgšanās ir pasūtīta Helmholca spoļu iekārtas izgatavošana.

Tika izstrādātas, izgatavotas un testētas dažādas konfigurācijas stikla šūnas, tajā skaitā – ar

bufera gāzes pildījumu un dažādu veidu pārklājumiem. Tika testētas šūnu un pārklājumu īpašības atkarībā no temperatūras un sārnu metālu atomu koncentrācijas.



1. attēls. (a) Eksperimentālās iekārtas shēma.
(b) eksperimenta ģeometrija, lai realizētu mērījumus ar $\Delta m=1$.

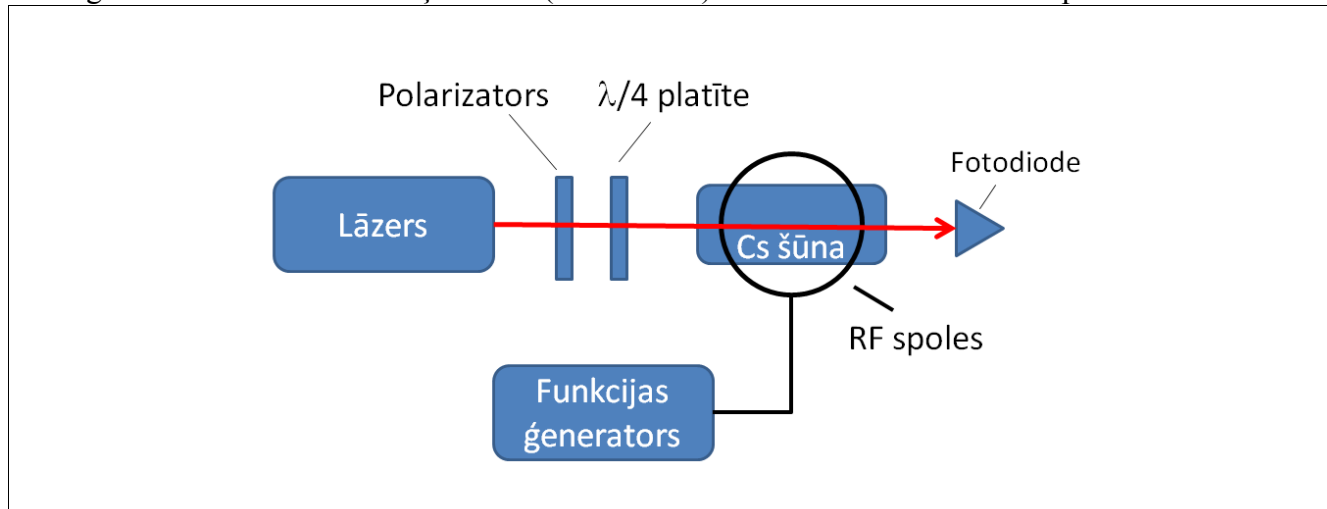


2.attēls. Eksperimentālā iekārta ar iespēju ievadīt gaismu ar 45° leņķi starp lāzera starojuma elektriskā lauka vektoru un magnētiskā lauka vektoru.

1.2 Magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduļa izveidošana.

Moduļa izstrāde

Balstoties uz iepriekšējā periodā iegūtās pieredzes un rezultātiem, tika izstrādāta magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduļa shēma (sk. 3. attēlu). Lāzera stars tiek cirkulāri polarizēts ar lineāro



3.attēls. Magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduļa iekārtas shēma.

polarizatoru un $\lambda/4$ platīti un apgaismo cēzija tvaikus šūnā, tādējādi optiski pumpējot atomus stāvoklī ar maksimālo leņķisko momentu. Pēc šūnas lāzera stars trāpa uz fotodiodei, kas reģistrē lāzera jaudu, kas ir izgājusi caur šūnu. Kad atomi tiek pumpēti stāvoklī ar maksimālo leņķisko momentu, fotodiode reģistrē maksimālo signālu. Funkciju ģenerators sintezē radiofrekvences signālu, kuru caur pastiprinātāju vada uz radiofrekvences (RF) spolēm. RF spoles ir montētas pie nanoizmēru šūnas tā, lai to RF fotoni ierosinātu pārejas starp magnētiskajiem apakšlīmeņiem ar $\Delta m=2$, kad RF fotoni ir rezonansē ar apakšlīmeņu sašķelšanos. Radiofrekvence tiek skanēta ar datora vadību. Brīdī, kad RF fotoni ir rezonansē ar apakšlīmeņu sašķelšanos, cēzija tvaiki var absorbēt fotonus, un fotodiode reģistrē mazāko signālu. Tādējādi var saistīt RF frekvenci, kas dod minimālo signālu, ar magnētiskā lauka vērtību, kas izraisa attiecīgo apakšlīmeņu sašķelšanos.

Nanopozicionēšanas mezgla izstrāde

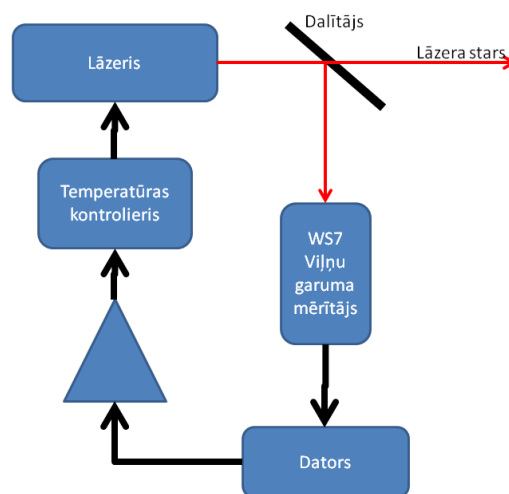
Lai mērītu magnētiskā lauka gradientus, stratēģija paredz mērīt magnētisko lauku vienā telpas apgabalā, kas atbilst nanoizmēru šūnas dimensijām, pēc tam pārvietot nanoizmēru šūnu ar zināmu paredzamu nobīdi un atkārtot magnētiskā lauka mērījumu. Magnētiskā lauka gradients atbilst starpībai starp diviem magnētiskā lauka mērījumiem, kas dalīta ar nobīdi. Regulējamo un atkārtojamo nobīdi var panākt ar Thorlabs MAX341 nanopozicionēšanas mezglu, kuru var vadīt ar datora palīdzību (sk. 4.attēlā). MAX341 nanopozicionēšanas mezgls izmanto jūtīgus miniatūrus elektrodzinējus un pjezoelementus, lai regulētu galdiņa nobīdi.



4.attēls. Thorlabs MAX341 nanopozicionēšanas mezgls.

Lāzera stabilizēšanas risinājuma izstrāde

Atkārtojamu signālu iegūšanai ir jānodrošina stabila lāzera frekvence. Lāzera frekvence ar laiku izmainās, ja temperatūras izmaiņas dēļ rezonatora dimensijas mainās vai arī, ja strāva nav stabila. Lai stabilizētu lāzera frekvenci, tika izmēģinātas pasīvas un aktīvas metodes. Pie pasīvām metodēm pieder lāzera rezonatora izolācija, izmantojot apvalku. Apvalks aizkavē temperatūras izmaiņas, novērš gaisa caurvēja ietekmi, bet šie pasākumi ir nepietiekami. Papildus tika izmantots Thorlabs LDC205 kontrolieris strāvas regulēšanai un divi TDC200C temperatūras kontrolieri rezonatora temperatūras stabilizēšanai. Lāzera starojuma frekvence (respektīvi, viļņa garums) tika kontrolēta ar WS7 viļņu garuma mērītāju. Izmantojot šos paņēmienus, bija iespējams panākt samērā stabilu darbību, bet tomēr režīms nebija pietiekami stabils atkārtojamiem magnētiskā lauka mērījumiem. Tāpēc tika izstrādāta atgriezeniskās saites sistēma starp WS7 viļņa garuma mērītāju un lāzera temperatūras kontrolieri, izmantojot *Labview* programmu. Kad viļņa garuma mērītājs reģistrē viļņa garuma izmaiņas, dators dod signālu, lai attiecīgi mainītu lāzera rezonatora temperatūru, un rezultātā viļņa garums atgrieztos normas robežās.

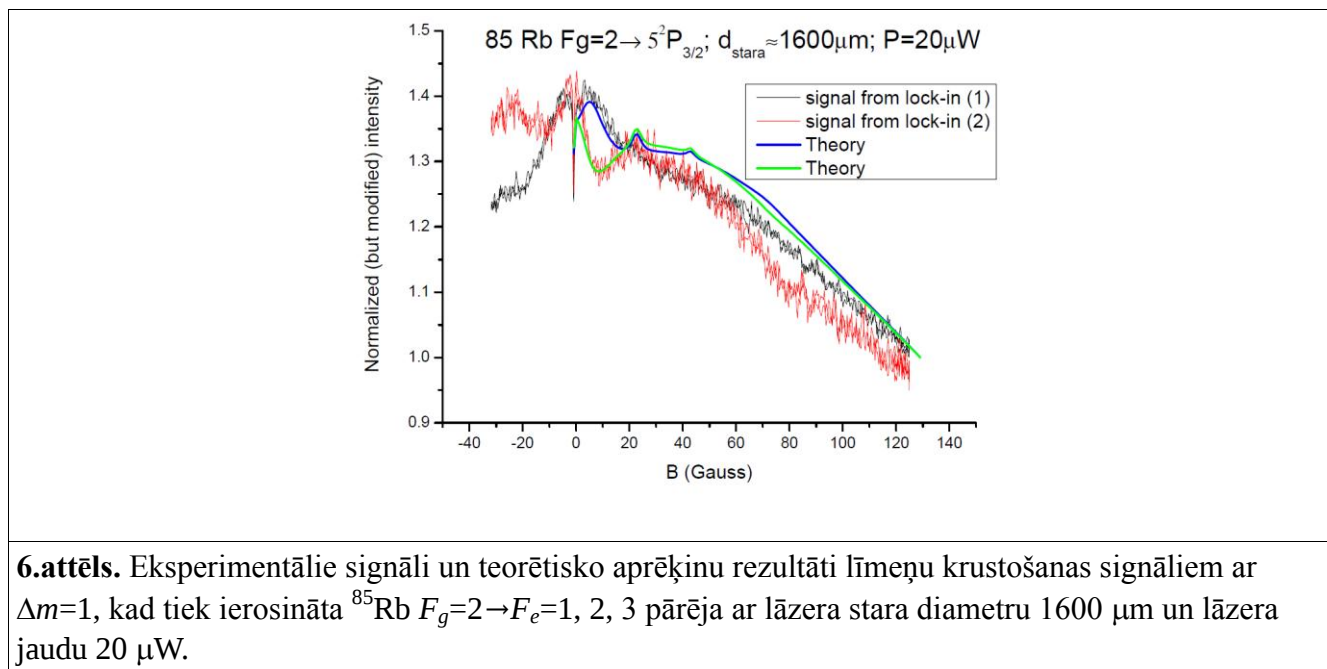


5. attēls. Lāzera stabilizēšanas atgriezeniskās saites shēma.

1.3. Teorētiskā modeļa pilnveidošana un adaptācija eksperimentāliem apstākļiem

Magnetooptiskie signāli ar $\Delta m=1$

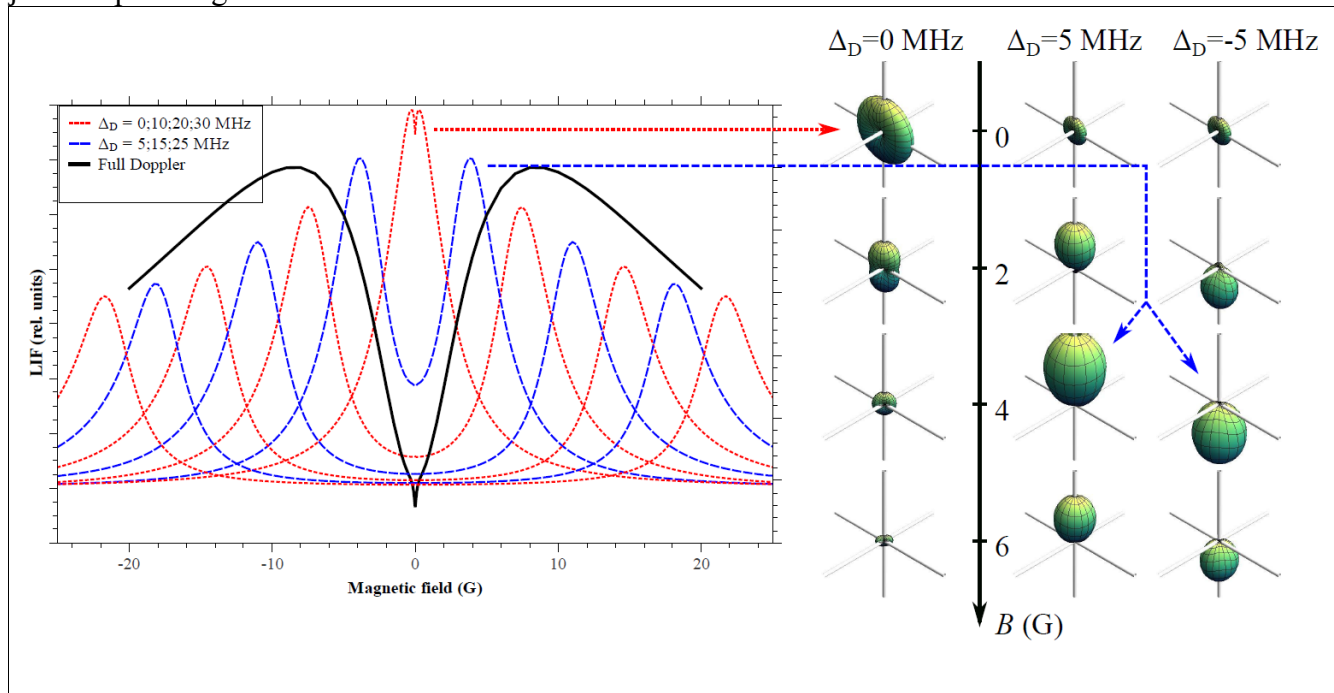
Gadījumos, kad līmeņu krustošanos var raksturot ar $\Delta m=1$, un ja ierosinošā lāzera starojuma elektriskais vektors veido 45° leņķi ar ārējā magnētiskā lauka vektoru, var notikt interesants efekts, ko sauc par izkārtošanās pāreju orientācijā. Efekts izpaužas tādā veidā, ka reģistrācijā tiek novērota cirkulāri polarizēta fluorescence, kaut arī ierosme notiek ar lineāri polarizētu gaismu. Iegūtie signāli ir atkarīgi no magnētiskā lauka vērtības, kas ir nepieciešams magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai. Turklāt, šo signālu modelēšana ir iespēja pārbaudīt izveidoto teorētisko modeli. Tika uzņemti līmeņu krustošanās spektri dažādām pārejām un salīdzināti ar teorētiskā modeļa dotajiem rezultātiem. Ir redzams, ka teorētiskais modelis spēj aprakstīt eksperimentālos rezultātus, kaut arī ir nepieciešams novērst nepilnības eksperimentā, lai demonstrētu labu sakritību starp eksperimentu un teorētisko aprēķinu visām pārejām. 6.attēlā redzami eksperimentālie signāli un teorētisko aprēķinu rezultāti eksperimentam ar $\Delta m=1$ līmeņu krustošanās signāliem.



Plātās struktūras izpēte

Parasti galvenā uzmanības tiek veltīta magnetooptisko signālu šaurai struktūrai ap nulles magnētiskā lauka vērtībām. Tomēr, pētot signālu struktūru pie lielākām magnētiskā lauka vērtībām, tika atklātas interesantas pielietojuma iespējas. Pētījumi parādīja, ka atkarībā no magnētiskā lauka vērtības, tiek ietekmētas dažādas atomu ātrumu grupas. Tā kā reģistrējamie signāli ir atomu leņķiskā momenta sadalījuma izpausme, rezultātā dažādas ātrumu grupas var raksturot ar dažādu leņķiskā momenta sadalījumu (sk. 7.attēlā). Līdz ar to, izvēloties, piemēram, konkrētu ātrumu grupu ar magnētiskā lauka vai lāzera frekvences pieregulēšanu, var izvēlēties konkrētu leņķiskā momenta sadalījumu atomos. Tādu informāciju var izmantot divpakāpju ierosmē, ar ko varētu ierosināt atomāros līmeņus ar dažādām

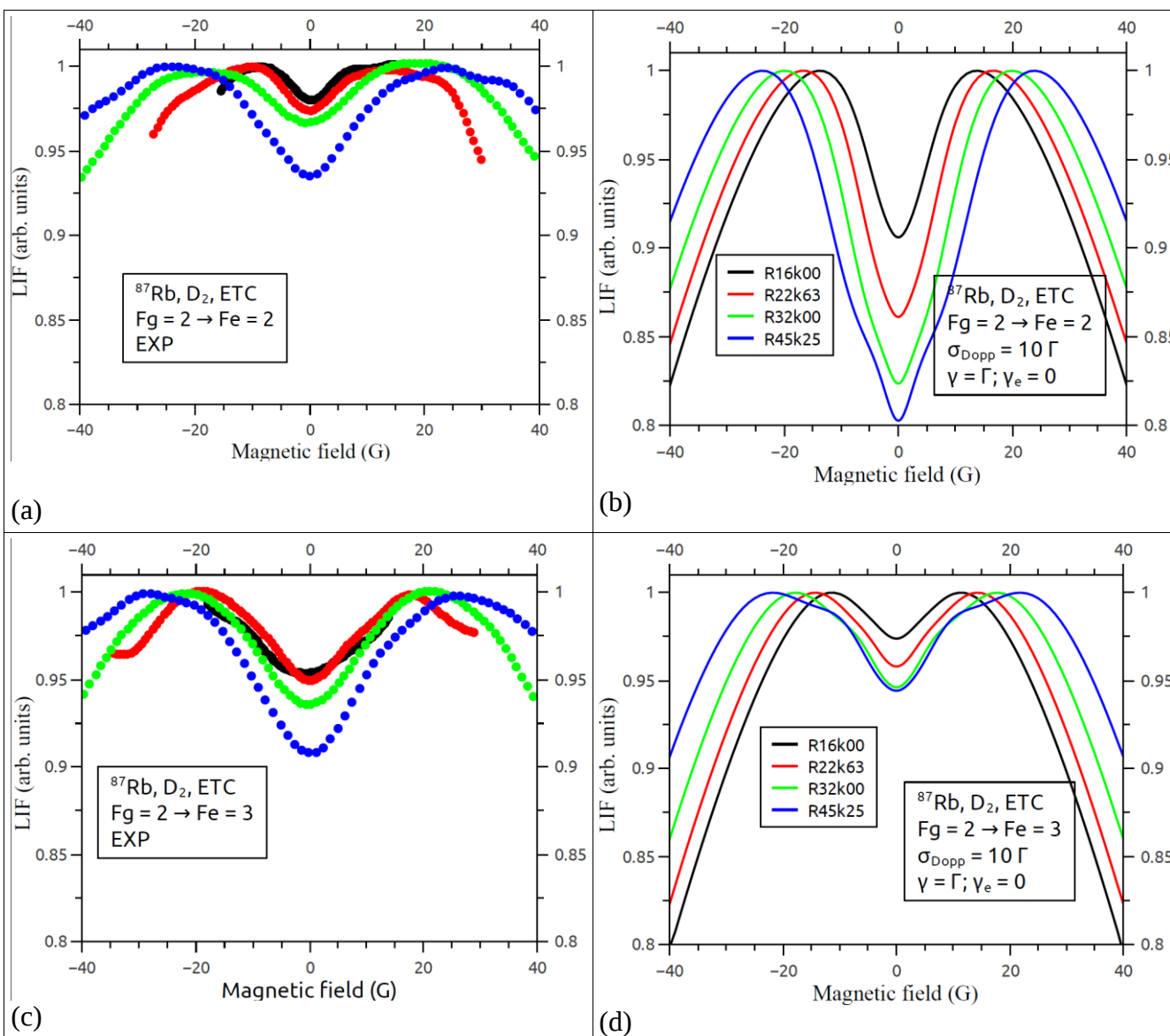
jūtībām pret magnētisko lauku.



7.attēls. Ieguldījums fluorescences signālā (attēla kreisajā pusē) un leņķiskā momenta sadalījumā (attēla labajā pusē), ko dod katra ātruma grupa atkarībā no magnētiskā lauka vērtības.

Nanoizmēru šūnas signālu modelēšana

Turpinājās darbs pie uz optiskajiem Bloha vienādojumiem balstītā teorētiskā modeļa modificēšanas un optimālu modeļa parametru meklēšanas, aprakstot īpaši plānā rubīdija atomāro tvaiku šūnā rubīdija D2 ierosmē reģistrētās magnetooptiskās rezonanses. Tika atmesta iepriekš izvirzītā hipotēze par dzīves laika paplašinājumu spektrālajām līnijām, konstatējot, ka šis apraksts nerada būtiskas izmaiņas salīdzinot ar dabisko līniju paplašināšanos, kas ir iekļauta teorētiskajā modelī. Uzsāktas literatūras studijas par atoma mijiedarbību ar šūnas sienām atomārās pārejas ierosinātajā stāvoklī tuvā lauka (*near field*) tuvinājumā. 8.attēlā redzami daži eksperimentāli un teorētiskie rezultāti. Par modeļa pielāgošanu īpaši plānā šūnā reģistrēto magnetooptisko rezonansu aprakstam sagatavots ziņojums pētniecības grupas iekšējam semināram 2012. gada 9. maijā.

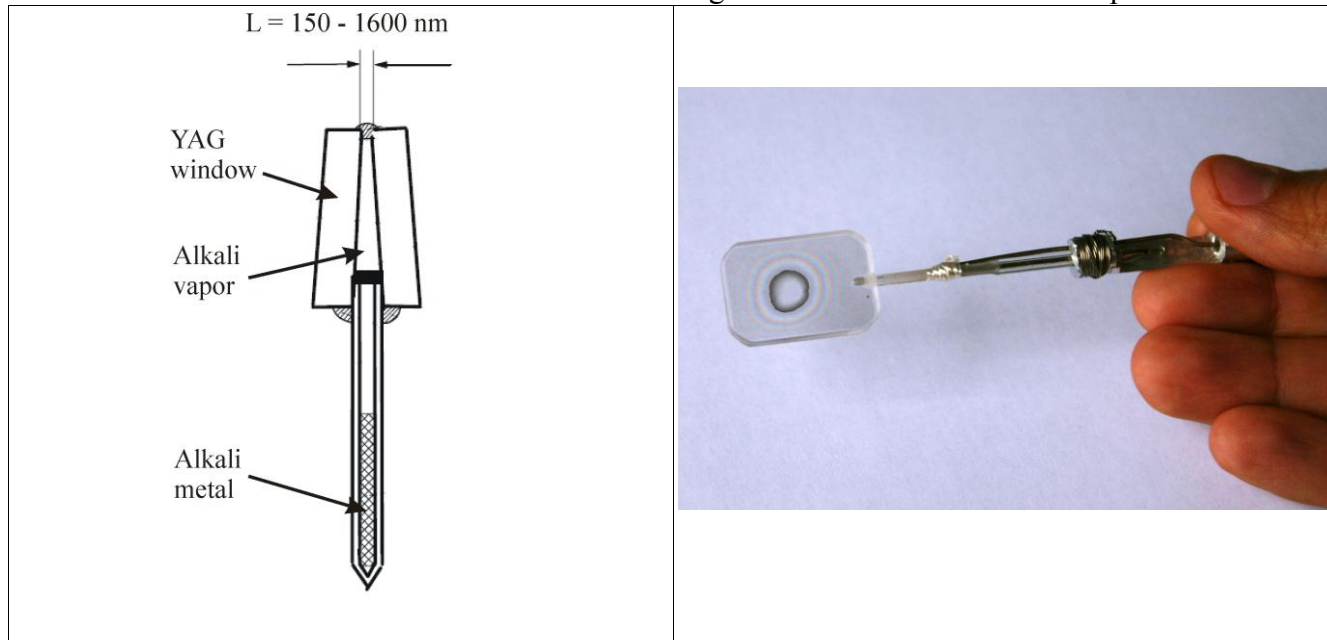


8.attēls. Eksperimentālie signāli no nanoizmēru šūnas (a) ^{87}Rb $F_g=2 \rightarrow F_e=2$ pārejai un (c) ^{87}Rb $F_g=2 \rightarrow F_e=3$ pārejai. Teorētisko aprēķinu rezultāti (b) ^{87}Rb $F_g=2 \rightarrow F_e=2$ pārejai un (d) ^{87}Rb $F_g=2 \rightarrow F_e=3$ pārejai.

Uz optiskajiem Bloha vienādojumiem balstītajā teorētiskajā modelī, kas tiek izmantots magnetooptisko rezonanšu aprakstam Rb D_2 atomāro pāreju ierosmē īpaši plānā šūnā, ir iekļauts elastīgu sadursmju modelis. Tas apraksta ierosinātā stāvokļa leņķiskā momenta projekciju uz kvantēšanās ass izmaiņas sadursmēs ar šūnas sienām. Ar šādu modeli tika veiktas simulācijas, aprēķinot magnetooptisko rezonanšu profilus, kuru rezultātā secināts, ka izmantojot elastīgo modeli, nav iespējams iegūt apmierinošu eksperimentālo signālu aprakstu. Plānots turpināt darbu, pētot sadursmju ietekmi uz magnetooptisko rezonanšu signāliem, kas iegūti īpaši plānās šūnās.

1.4 Prototipa iekārtas izveide

Prototipa izveidei izmantota iepriekš iegādāta nanoizmēru šūna ar cēzija pildījumu, kuru paredzēts izmantot kopā ar nesēn iegūtajiem DFB lāzeriem (sk. 1.1.sadaļā). Nanoizmēru šūna sastāv no diviem YAG kristāliem, starp kuriem ir sārmu metālu atomu gāzes slānis, šajā gadījumā - cēzijs. Nanoizmēru šūna ir shematiski attēlota 9.attēlā un fotogrāfiski 10.attēlā. Attālums starp kristāla sienām

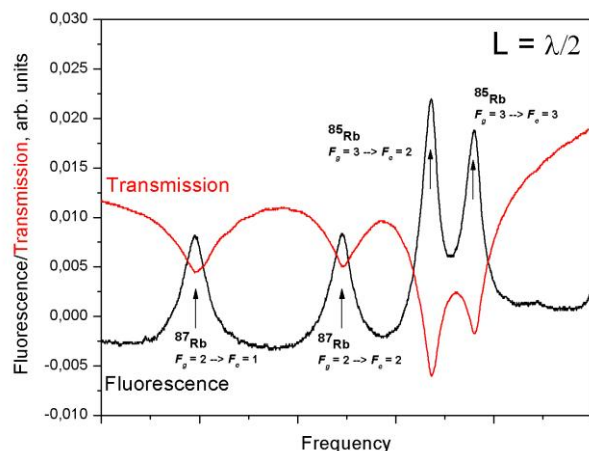


9.attēls. Nanoizmēra šūnas shematisks attēls.

10.attēls. Nanoizmēra šūna ar cēzija pildījumu.

atkarībā no pozīcijas mainās no 150 nm līdz 1600 nm. Šūnas ar tādiem izmēriem ir unikālas pasaulē. Tām piemīt īpašība, ka atomu kustība lielā mērā notiek ierobežotā 2-dimensionālā slānī, kas ir paralēls kristāla sienām. Līdz ar to, atomu ātrumu sadalījums lāzera stara virzienā ir stingri šaurāks nekā parastā šūnā. Arī iegūtie spektri ir šaurāki nekā spektri, kurus reģistrē parastā stikla šūnā (sk. 11.attēlā). Doplera nobīdes dēļ parastā stikla šūnā nebūtu iespējams izšķirt, piemēram, pārejas pīķus $^{85}\text{Rb } F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$ un $^{85}\text{Rb } F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$, bet, kā redzams attēlā, pārejas var viegli izšķirt, izmantojot nanoizmēru šūnu. Vēl svarīgāk realizējamā projekta izpildei ir tas, ka lāzera starojums mijiedarbojas ar atomu slāni, kura izmēri ir tikai daži simti nanometru, un tas nodrošina augstu telpisko izšķirtspēju, kas ir šī projekta mērķis.

Lai novērotu signālus, nanoizmēru šūnu ir nepieciešams sildīt, jo atomu skaits, kas piedalās mijiedarbībā ar lāzera starojumu, ir mazs. Tāpēc tika izveidota īpaša krāsns, kas var nodrošināt temperatūru ap 140°C , kas ir pietiekama, lai reģistrētu signālus. Krāsns būs prototipa sastāvdaļa un ir attēlota 12.attēlā.



11.attēls. Nanoizmēra šūnā iegūts LIF ierosmes spektrs ar labi izšķirti pārejas pīķiem ^{85}Rb $F_g=3 \rightarrow F_e=2$ un ^{85}Rb $F_g=3 \rightarrow F_e=3$.



12.attēls. Nanoizmēra šūnas sildīšanas krāsns.

Pārskata periodā tika izsludināts iepirkuma konkurss materiāliem, kas būs nepieciešami, lai izveidotu prototipa iekārtu.

4. Pētniecības rezultātu publiskas pieejamības nodrošināšana

Lai nodrošinātu pētniecības rezultātu publisku pieejamību:

- ✦ ir aktualizēta informācija projekta mājas lapā internetā (www.lu.lv/magn);
- ✦ žurnālā *Physical Review Letters* ir nopublicēts raksts, kurā viens no projekta dalībniekiem ir līdzautors:
A. Jarmola, V. M. Acosta, K. Jensen, S. Chemerisov, D. Budker, "Temperature and magnetic field dependent longitudinal spin relaxation in nitrogen-vacancy ensembles in diamond", *Phys. Rev. Lett.* 108, 197601 (2012).
- ✦ par pētījumu rezultātiem ziņots 2 starptautiskās konferencēs un ir nopublicētas konferenču tēzes.

EGAS 44 konferencē, kas notika Gēteborgā, Zviedrijā no 09.07.12. līdz 13.07.12. divi referāti:

M. Auzinsh, A. Berzins, R. Ferber, F. Gahbauer, L. Kalvans, and A. Mozers "Coherent and non-coherent magneto-optical effects in the $5P_{3/2}$ state of atomic Rubidium"

O. Nikolayeva, M. Tamanis, R. Ferber, and E. Tiemann "Fourier transform spectroscopy of KCs and potential construction of ground $X^1\Sigma^+$ and $d^3\Sigma^+$ states at large internuclear distance"

viens referāts ICAP 2012 konferencē, kas notika Parīzē no 23.07.12. līdz 27.07.12.:

M. Auzinsh, A. Berzins, R. Ferber, F. Gahbauer, L. Kalvans, A. Mozers and D. Opalevs, "Conversion of bright magneto-optical resonances into dark by changing temperature at fixed laser frequency for D_2 excitation of atomic rubidium"

▲ jūnijā tika veiksmīgi aizstāvēti divi bakalaura darbi, kas saistīti ar teorētiskā modeļa pilnveidošanu, kas izmantots šajā projektā:

- Uldis Kalniņš - "Koherentas atomu ierosmes modelēšana, ņemot vērā enerģijas sadalījumu lāzera stara profilā" (vadītājs Linards Kalvāns)
- Reinis Lazda - "Tumšo un gaišo stāvokļu izpēte reālās un hipotētiskās atomārās sistēmās" (vadītājs Linards Kalvāns)

▲ veiksmīgi aizstāvēts viens maģistra darbs par projekta tematiku:

Laima Bušaite - "Elektromagnētiskā starojuma grupas ātruma izmaiņas modelēšana atomāro tvaiku vidē" (vadītājs Linards Kalvāns)

- ▲ Divi doktoranti – Arturs Mozers un Andris Bērziņš turpina pētījumus par tematiku, kas saistīta ar projekta uzdevumu izpildi un plāno saistīt savus promocijas darbus ar projekta rezultātiem.
- ▲ No 2012.g. 1.oktobra uzsākti iknedēļas semināri, kas veltīti slāpekļa vakanču centru pētījumiem, kuriem ir interesantas īpašības, kas ļauj mērīt magnētiskos laukus un to gradientus ar augstu telpisko izšķirtspēju.

Projekta zinātniskais vadītājs

Prof. R. Ferbers