

**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 01.11.2012 līdz 30.04.2012.

Ievads

Pateicoties laboratorijas iekārtu un programmatūras attīstībai periodā no 01.07.2011 līdz 31.10.2011, pagājušajā pusgadā bija iespējams veikt daudzus eksperimentus. Tika izveidots vienkāršs magnētiskā laukā un tā gradienta mērīšanas modulis, ar kuru iegūt pieredzi prototipa izveidei. Daudzie iegūtie eksperimentālie dati ļāva attīstīt un pilnveidot teorētisko modeli. Turpinājās aktivitātes saistībā ar laboratorijas izveidošanu un programmatūras attīstību.

1. Pētniecība

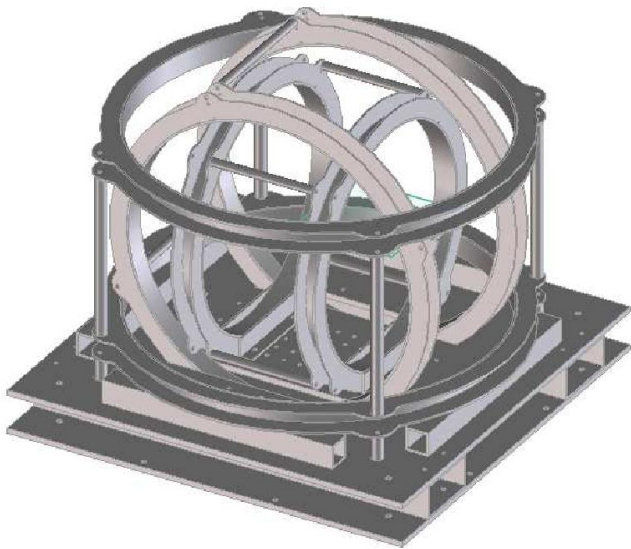
1.1. Laboratorijas iekārtas izveidošana, testēšana un optimālo eksperimentālo apstākļu piemeklēšana

Laboratorijas iekārtas izveidošana

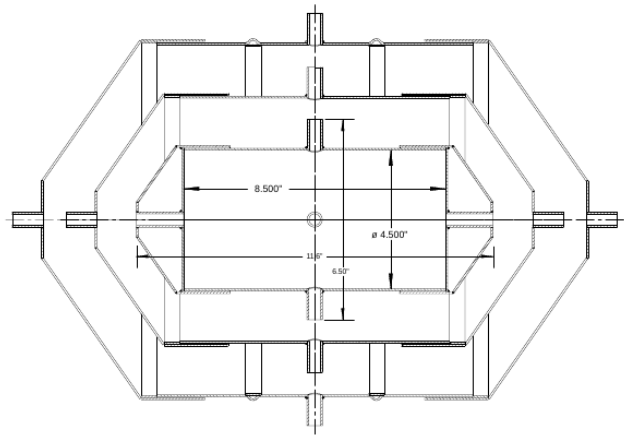
Tika pabeigts tehniskais projekts Helmholca spolēm. Līdz 2011.g. oktobra beigām bija izpētīti spoļu vēlamie parametri un tika izstrādāta vajadzīgā koncepcija. Atlika izstrādāt detalizētu tehnisko projektu. Ar 3-dimensionālu modelēšanas programmu *FreeCAD* tika izstrādāts tehniskais projekts 3 dimensijās, kas redzams 1.attēlā. Pēc tam, ar programmu *Creo Elements* 3-dimensionālais projekts tika pārveidots 2-dimensionālos, lai nodotu tehniskajai darbnīcai. Specifikācijas šobrīd ir gatavas, un pašlaik tiek organizēts konkurss spoļu izgatavošanai.

Bez Helmholca spolēm būs vajadzīga arī magnētisko lauku ekranējoša iekārta, lai labāk definētu magnētiskā lauka vērtību un pētītu magnetometra jūtīgumu pie ļoti maziem laukiem. Magnētisko lauku ekranējošo iekārtu veido no mī-metāla, kuram raksturīga liela magnētiskā caurlaidība, kā rezultātā magnētiskā lauka spēka līnijas seko metālam, bet to nešķērso. Līdz ar to, magnētiskais lauks mī-metāla trauka iekšienē ir ievērojami mazāks nekā ārpusē. Pētījām, cik daudz mī-metālu slāņu būtu vajadzīgi, lai iegūtu pietiekoši mazu magnētisko lauku. Pēc tam izstrādājām tehnisko projektu, pamatoties uz citur izmantotām magnētiskā lauka ekranēšanas iekārtām (2. attēls). Tehniskās specifikācijas ir gatavas, un konkurss izgatavošanai tiks sludināts, kad būs gatavas specifikācijas visiem projektā nepieciešamajiem materiāliem, jo visi vajadzīgie materiāli jāiegādājas vienlaicīgi.

Būs vajadzīgi radiofrekvences (RF) lauki, lai veiktu tālākus eksperimentus un gatavotu prototipu. Turklāt izrādījās, ka manipulējot slāpekļa vakanču centru spinus ar mikroviļņu (MV) laukiem, var izveidot ļoti jūtīgus magnetometrus ar lielo telpisko izšķirtspēju. Tāpēc pētījām RF un MV komponentes, kas varētu kalpot mūsu eksperimentos un prototipā. Tika gatavotas tehniskās specifikācijas konkursam. Kad būs skaidrība par pārējiem projekta iepirkumiem, drīkstēsim izsludināt konkursu.



1. attēls. Helmholtza spoļu 3D modeļa galīgais variants.



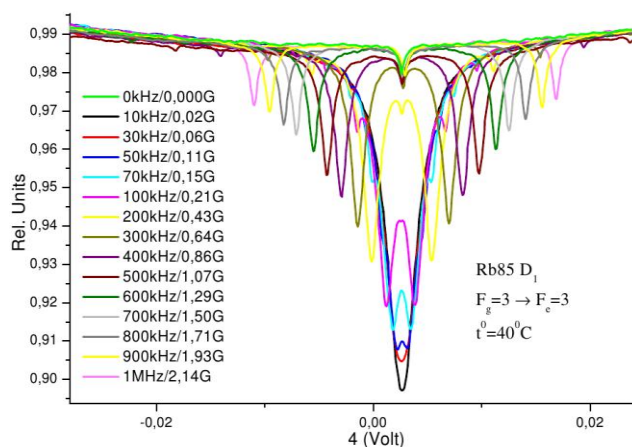
2. attēls. Trīs līmeņu magnētiskā ekrāna koncepcija.

1.2 Magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduļa izveidošana.

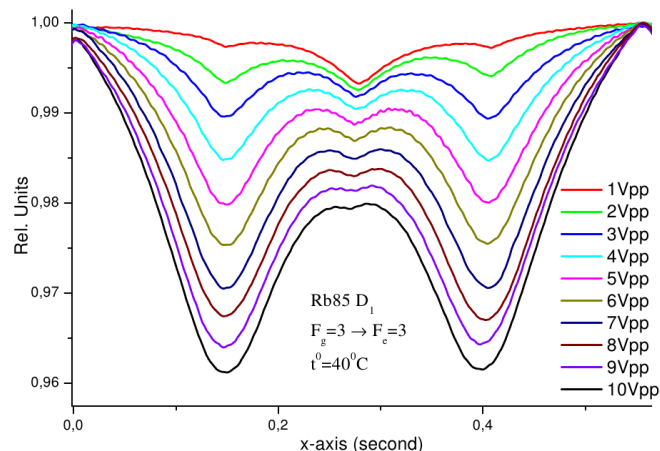
Lai mērītu magnētiskos laukus, un līdztekus to gradientus, izveidojām magnētiska lauka mērīšanas moduli. Kā tehnisks risinājums tika izvēlēta magnētiskā lauka mērīšana ar optiskām radiofrekvences dubultrezonansēm. Šis efekts saista magnētiskā lauka vērtību ar precīzu radiofrekvences vērtību. Priekšrocība ir tā, ka frekvence ir lielums, kur var mērīt visprecīzāk, un kalibrācijas kļūdas mēdz būt mazas, jo radiofrekvences vērtība ir atkarīga tikai no magnētiskā lauka vērtības un atoma Landē faktora, kas ir labi zināms. Mērīšanas modulis ir arī salīdzinoši vienkāršs. Ir nepieciešams gaismas avots ar viļņa garumu, kas atbilst atomu pārejai, polarizators, šūna ar sārnu metālu tvaikiem, gaismas intensitātes mērītājs (fotodiode), RF ģenerators un RF spoles. Princips ir sekojošs: lāzera starojuma ietekmē atomi nonāk tumšos stāvokļos. Kad radiofrekvence atbilst magnētisko apakšlīmeņu sašķelšanās vērtībai magnētiskajā laukā, atomi atkal mijiedarbojas ar lāzera starojumu. 3.attēlā parādīts sārnu tvaiku caurspīdīgums (y-ass) atkarībā no magnētiskā lauka vērtības (x-ass). Ir redzamas rezonanses, kas veidojas, kad magnētiskais lauks atbilst radiofrekvencei. Attēlā redzamas vairākas līknes pie dažādām radiofrekvences vērtībām. Pie katras radiofrekvences vērtības rezonanse atrodas citā vietā pa x-asi, kas ir saistīts ar magnētisko lauku.

Pēc moduļa izveidošanas arī turpinājām pētīt optimālos parametrus. 4.attēlā redzams sārnu tvaiku caurspīdīgums (y-ass) atkarībā no magnētiskā lauka (x-ass) pie dažādām RF jaudas vērtībām. Redzams, ka pie mazākām RF jaudām (sarkanā līkne) rezonanses ir šaurākas, bet pie lielākām jaudām (melnā līkne) rezonanses kontrasts ir daudz izteiktāks. 5.attēlā redzams caurspīdīgums (y-ass) atkarībā no magnētiskā lauka (x-ass) ^{87}Rb , bet 6.attēlā ^{85}Rb , pie dažādām lāzera starojuma intensitātēm. Redzams, ka rezonanses kontrasts samazinās pie pārāk mazām un pārāk lielām lāzera starojuma intensitātēm.

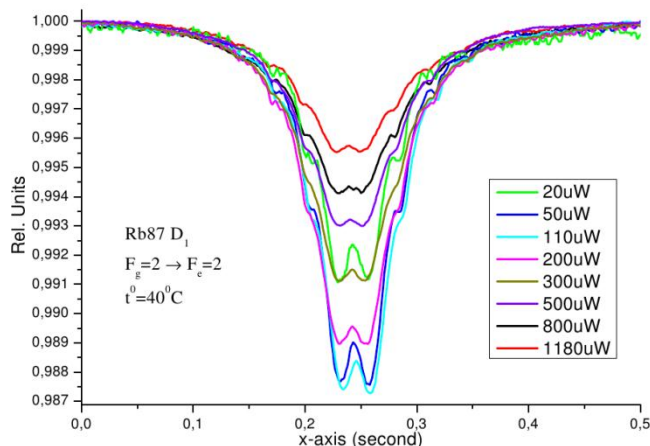
Pagaidām magnētiskā lauka mērīšanas modulī ir parastā sārnu metālu šūna. Nākamais solis ir aizvietot parasto šūnu ar nanoizmēru šūnu un piefiksēt to uz 3-asu kustības iekārtas magnētiskā gradienta mērīšanai.



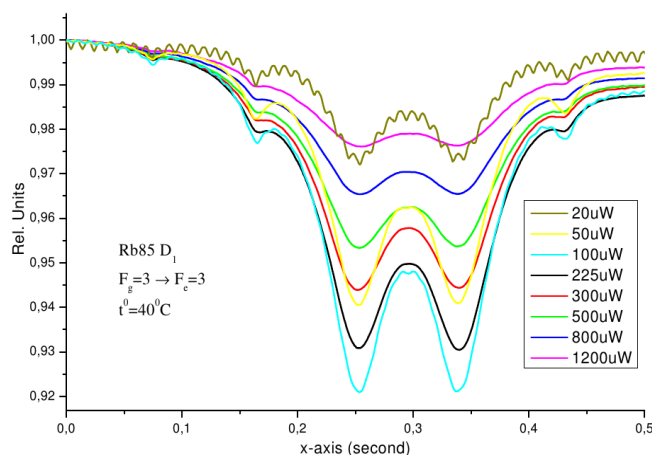
3. attēls. Caurspīdīgums atkarība no magnētiskā lauka pie dažādām RF frekvencēm.



4. attēls. Caurspīdīgums atkarība no magnētiskā lauka pie dažādām RF lauka jaudām.



5. attēls. Caurspīdīgums atkarība no magnētiskā lauka ^{87}Rb pie dažādām lāzera starojuma intensitātēm.



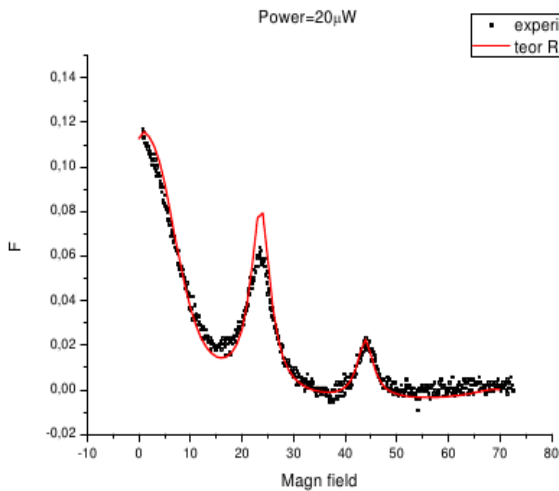
6. attēls. Caurspīdīgums atkarība no magnētiskā lauka ^{85}Rb pie dažādām lāzera starojuma intensitātēm.

1.3. Teorētiskā modeļa pilnveidošana un adaptācija eksperimentāliem apstākļiem

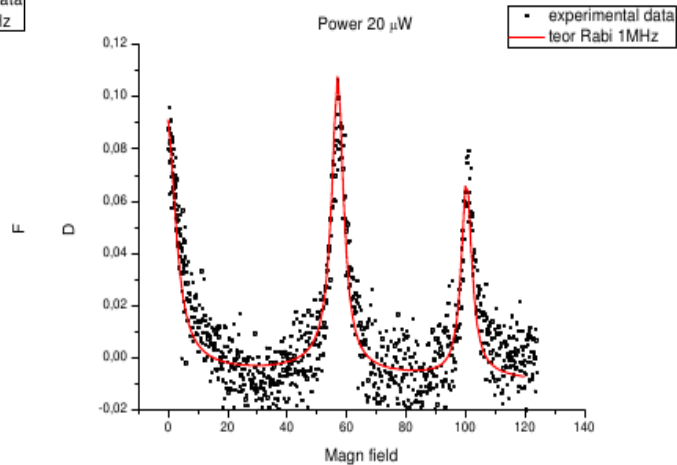
Turpinājās darbs pie teorētiskā modeļa pilnveidošanas un tā adaptācijas eksperimentāliem apstākļiem. Kopš iepriekšējā perioda esam veikuši daudz eksperimentu dažādos apstākļos. Tajā pašā laikā varējām izmantot iepriekš attīstītas datu apstrādes metodes un pieredzi. Līdz ar to, bija iespējams modelēt daudzus signālus, kuri ir atkarīgi no magnētiskā lauka un var kalpot dažādu veidu magnētiskā laukā un to gradienta mērīšanas iekārtām. Dažos gadījumos atbilstība starp eksperimentāliem datiem un teorētisko modeli ir ļoti precīza. Citos gadījumos vēl nepieciešams saprast visas eksperimenta un fizikālo efektu nianšes.

Nenulles rezonanses

Daudz tika pētīti magnetooptiskās rezonanses ap nulles magnētisko lauku, bet pastāv arī rezonanses pie lielākiem laukiem. Tie tika pētīti arī iepriekš, bet tagad mūsu teorētiskais modelis ļauj signālus aprakstīt precīzāk, nekā tas bija iespējams agrāk. Apstarojot rubīdija atomus ar lineāri polarizētu lāzera starojumu, parādās rezonanses lāzera inducētās fluorescences (LIF) polarizācijas pakāpes signālā pie 22 G un 45 G (^{85}Rb) un pie 57 G un 102 G (^{87}Rb). Polarizācijas pakāpes atkarība no magnētiskā lauka vērtības var kalpot, lai noteiktu nezināmu magnētisko lauku. 7.attēlā parādīta LIF polarizācijas pakāpe ^{85}Rb , bet 8.attēlā ^{87}Rb atomos. Pēc optimālo modeļa parametru piemeklēšanas teorētiskais modelis (sarkanā līkne) ļoti labi apraksta eksperimentālos signālus (melnie punkti).



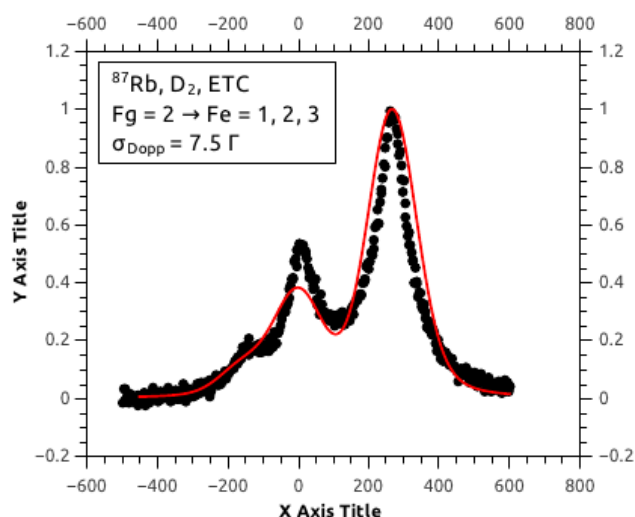
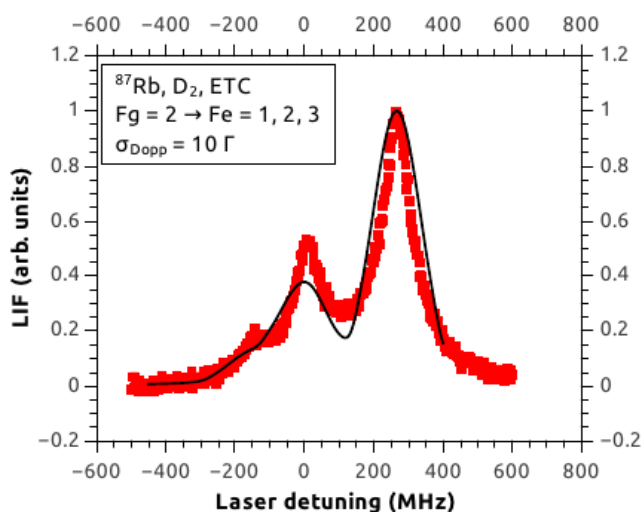
7. attēls. Nenulles rezonanses ^{85}Rb . Attēlā parādīta LIF polarizācijas pakāpes atkarība no magnētiskā lauka. Punkti rāda eksperimentālos mērījumus, bet līkne parāda teorētiskā modeļa rezultātu.



8. attēls. Nenulles rezonanses ^{87}Rb . Attēlā parādīta LIF polarizācijas pakāpes atkarība no magnētiskā lauka. Punkti parāda eksperimentālos mērījumus, bet līkne rāda teorētiskā modeļa rezultātu.

Nanoizmēru šūna

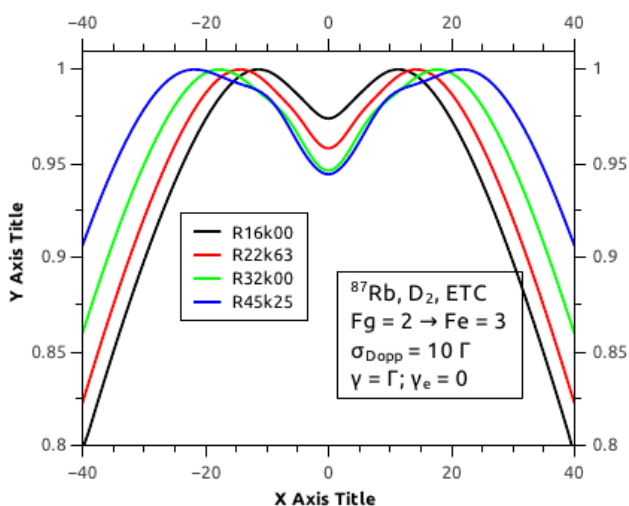
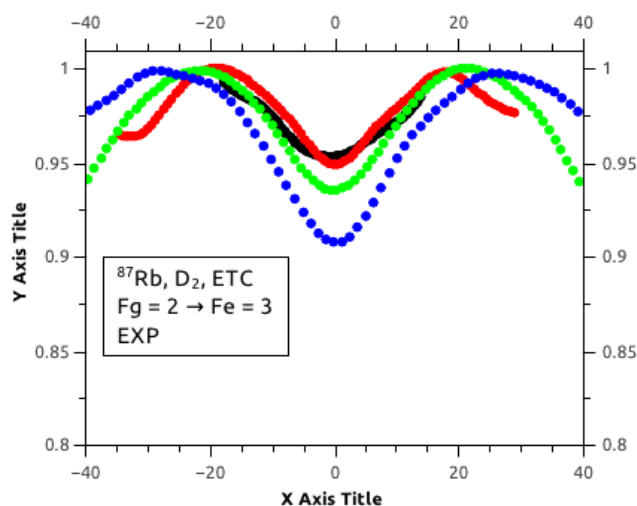
Projekta īstenošanai ir ļoti būtiski modelēt magnetooptiskos signālus nanoizmēru šūnā, jo nanoizmēru šūna dot iespēju mērīt magnētiskos laukus un to gradientus ar nanometrisku izšķirtspēju, kas ir projekta mērķis. Tajā pašā laikā, pareizi modelēt magnetooptiskos signālus nanoizmēru šūnā ir sarežģīti, jo atomi ļoti ātri saduras ar sienām, kuru attālums ir mazāks par mikrometru. Iespējams, ka pastāv jauni fizikāli efekti, kas ietekmē modeļa parametrus citādi, nekā parastā stikla šūnā. Pirmais solis ir noteikt Doplera platumu nanoizmēru šūnā. Tas ir svarīgi, jo Doplera platuma samazināšana ir viena no nanoizmēru šūnas priekšrocībām un ļauj izšķirt atoma pārejas, kas nav izšķiramas parastā šūnā. 9.attēls un 10.attēls rāda vienus un tos pašus LIF ierosmes spektra eksperimentālos datus (punkti), bet teorētiskās līknes iegūtas ar atšķirīgiem Doplera platumiem, lai meklētu Doplera platuma vērtību, kas vislabāk apraksta LIF ierosmes spektra datus. Atbilstība starp eksperimentu un teoriju jau ir apmierinoša.



9. attēls. LIF ierosmes spektrs nanoizmēru šūnā pie ^{87}Rb D_2 līnijas. Punkti rāda eksperimentālos mērījumus, bet līkne parāda teorētiskā modeļa mērījumus, bet līkne parāda teorētiskā modeļa rezultātu ar Doplera platumu $s_{\text{Dopp}}=10\text{G}$.

10. attēls. LIF ierosmes spektrs nanoizmēru šūnā pie ^{87}Rb D_2 līnijas. Punkti rāda eksperimentālos mērījumus, bet līkne parāda teorētiskā modeļa mērījumus, bet līkne parāda teorētiskā modeļa rezultātu ar Doplera platumu $s_{\text{Dopp}}=7,5\text{G}$.

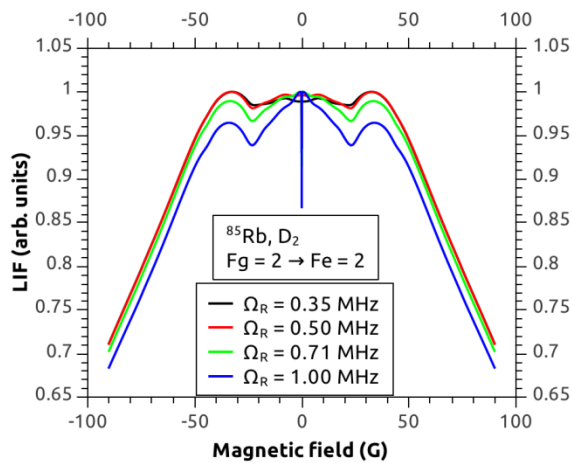
Zinot pareizo Doplera platuma vērtību, var pievērsties magnetooptisko rezonанšu aprakstīšanai ar teoriju. Pirmie rezultāti attēloti 11.attēlā. Eksperimentālie rezultāti no nanoizmēru šūnas ir redzami kreisajā attēlā, bet teorētiskie aprēķini - labajā. Gan eksperimenti, gan teorija atbilst $F_g=2 \rightarrow F_e=3$ pārejai ^{87}Rb D_2 līnijai. Redzams, ka eksperimentālie un teorētiskie rezultāti ir kvalitatīvi līdzīgi, bet teorētiskais modelis ir jāturpina attīstīt, lai precīzi aprakstītu eksperimentālos datus ar teoriju.



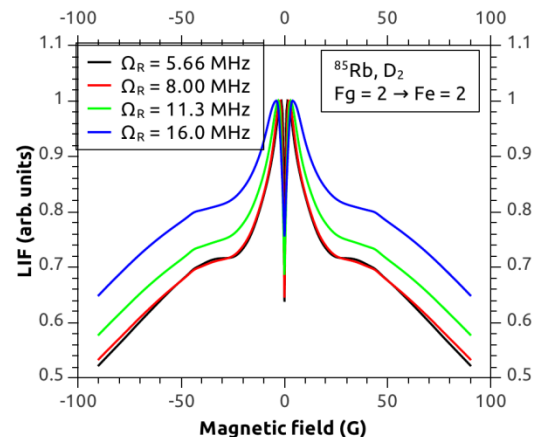
11. attēls. LIF (y-ass) atkarība no magnētiskā laukā (x-ass) nanoizmēra šūnā pie $F_g=2 \rightarrow F_e=3$ ierosmes D_2 līnijai. Eksperimentālie rezultāti ir kreisajā attēlā, bet aprēķinu rezultāti pēc teorētiskā modeļa - labajā attēlā.

Parasta šūna pie lielākiem magnētiskā lauka vērtībām

Kaut arī projektā paredzēts magnetometra īstenošanai izmantot nanoizmēru šūnas, daudz var uzzināt, pētot dziļāk magnetooptiskus signālus parastās šūnās. 12.attēls un 13.attēls rāda teorētisko aprēķinu rezultātus, kas iegūti parastā šūnā pie lielākām magnētiskā lauka vērtībām, līdz 100 G. LIF intensitāte strauji mainās atkarībā no magnētiskā lauka pie lauka vērtībām virs 30 G, kas ir noderīgi pats par sevi. Turklāt, fizikālie efekti, kas nosaka LIF intensitātes atkarību no magnētiskā lauka vērtībām parastā šūnā, varētu būt tie paši, kas ietekmē signālus nanoizmēru šūnās.



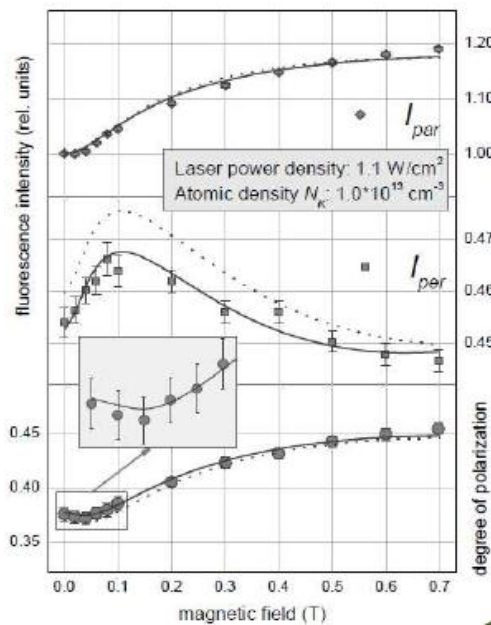
12. attēls. LIF atkarība no magnētiskā lauka parastā šūnā ^{85}Rb pie $F_g=2 \rightarrow F_e=2$ ierosmes D_2 līnijai. Rezultāti no teorētiskā modeļa pie mazām lāzera starojuma intensitātēm.



13. attēls LIF atkarība no magnētiskā lauka parastā šūnā ^{85}Rb pie $F_g=2 \rightarrow F_e=2$ ierosmes D_2 līnijai. Rezultāti no teorētiskā modeļa pie lielām lāzera starojuma intensitātēm.

Signāli pie īpaši lielām magnētiskā lauka vērtībām

Mazu magnētisko lauku un to gradientu vērtību mērīšanai ir diezgan plašs pielietojšanas lauks. Tomēr ir gadījumi, kad ir nepieciešams mērīt magnētisko lauku vērtības un to gradientus līdz pat tesla vērtībām. Projekta ietvaros tika veikti eksperimenti ar molekulām, kas ir piemēroti objekti, lai mērītu lielas lauka vērtības, jo molekulās LIF intensitāte ir atkarība no magnētiskā lauka vērtībām līdz pat dažiem kilogausiem (kG). Gan eksperimentālie, gan teorētiskie rezultāti ir redzami 14. attēlā, un ir konstatējams, ka teorētiskais modelis ļoti veiksmīgi apraksta eksperimentā iegūtos datus.



14. attēls. LIF intensitāte atkarībā no magnētiskā lauka vērtībā molekulās pie īpaši lielām magnētiskā lauka vērtībām.

2. Datorprogrammu izveide

2.1. Magnetooptisko signālu apstrādes algoritmu un programmu paketes izveide

Signālu apstrādes algoritmi tika pilnveidoti, kā rezultātā tagad ir iespējams salīdzināt daudz eksperimentālo signālu ar teorētisko aprēķinu rezultātiem, kā redzams iepriekšējos attēlos. Turklāt, tika iegūta pieredze ar Octave matricu manipulācijas valodu, ar GNUplot skriptiem, un ar python skriptiem.

2.2. Datorizētas eksperimenta vadības programmu izveide

Tika apgūta Labview eksperimentu vadības programmēšanas valoda un PulseBlaster kartes impulsu programmēšana. Iegūtās zināšanas tiks izmantotas NV centru izpētē, kad būs iepirkta nepieciešamās iekārtas.

4. Pētniecības rezultātu publiskas pieejamības nodrošināšana

Lai nodrošinātu pētniecības rezultātu publisku pieejamību:

1) ir aktualizēta projekta mājas lapa internetā (www.lu.lv/magn);

2) žurnālā *Physical Review A* ir nopublicēts raksts, kurā vairāki projekta dalībnieki ir līdzautori: M. Auzinsh, A. Berzins, R. Ferber, F. Gahbauer, L. Kalvans, A. Mozers, D. Opalevs, "Conversion of bright magneto-optical resonances into dark resonances at fixed laser frequency for D₂ excitation of atomic rubidium", *Physical Review A* **85**(3), 033418 (2012)

- 3) žurnālā *Physical Review Letters* ir pieņemts publicēšanai raksts, kurā viens projekta dalībnieks 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", arXiv:1112.5936.

- 4) ir iesniegtas 2 konferenču tēzes EGAS 44 konferencei, kas notiks Gēteborgā, Zviedrijā no 09.07.12. līdz 13.07.12.:

▲ 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 $a^3\Sigma^+$ states at large internuclear distance"

- 5) ir iesniegtas konferenču tēzes ICAP 2012 konferencē, kas notiks 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"

- 6) tiek izstrādāti trīs bakalaura darbi, kas saistīti ar teorētiskā modeļa pilnveidošanu:

▲ Uldis Kalniņš - "Koherentas atomu ierosmes modelēšana, ņemot vērā enerģijas sadalījumu lāzera stara profilā"

▲ Reinis Lazda - "Tumšo un gaišo stāvokļu izpēte reālās un hipotētiskās atomārās sistēmās"

▲ Laima Bušaite - "Elektromagnētiskā starojuma grupas ātruma izmaiņas modelēšana atomāro tvaiku vidē"

- 7) Divi doktoranti strādā pie projekta un plāno saistīt savas disertācijas ar projekta rezultātiem.

Secinājumi

Projekta mērķi pārskatā iekļautajā pusgada periodā tika izpildīti. No veiktajiem eksperimentiem uzkrāts materiāls vēl 2 vai 3 rakstiem, kurus plānojam gatavot publicēšanai, kad eksperimenti būs pilnībā pabeigti. Ir iegūta pieredze, kuru izmantojot, tuvākajā laikā varēsim izstrādāt prototipa iekārtu.

Projekta vadītājs:

Prof. R. Ferbers

14.05.2012.