



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”

Izveidotā jaunā magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduļa apraksts

Aktivitāte 1.2.

„Magnētiskā lauka gradienta mērīšanas moduļa izveidošana”

Aktivitātes periods: 01.10.2011.-31.12.2012.

Apstiprinu:

Vjačeslavs Kaščejevs
(Projekta padomes priekšsēdētājs)

Apstiprinu:

Ruvins Ferbers
(Zinātniskais vadītājs)

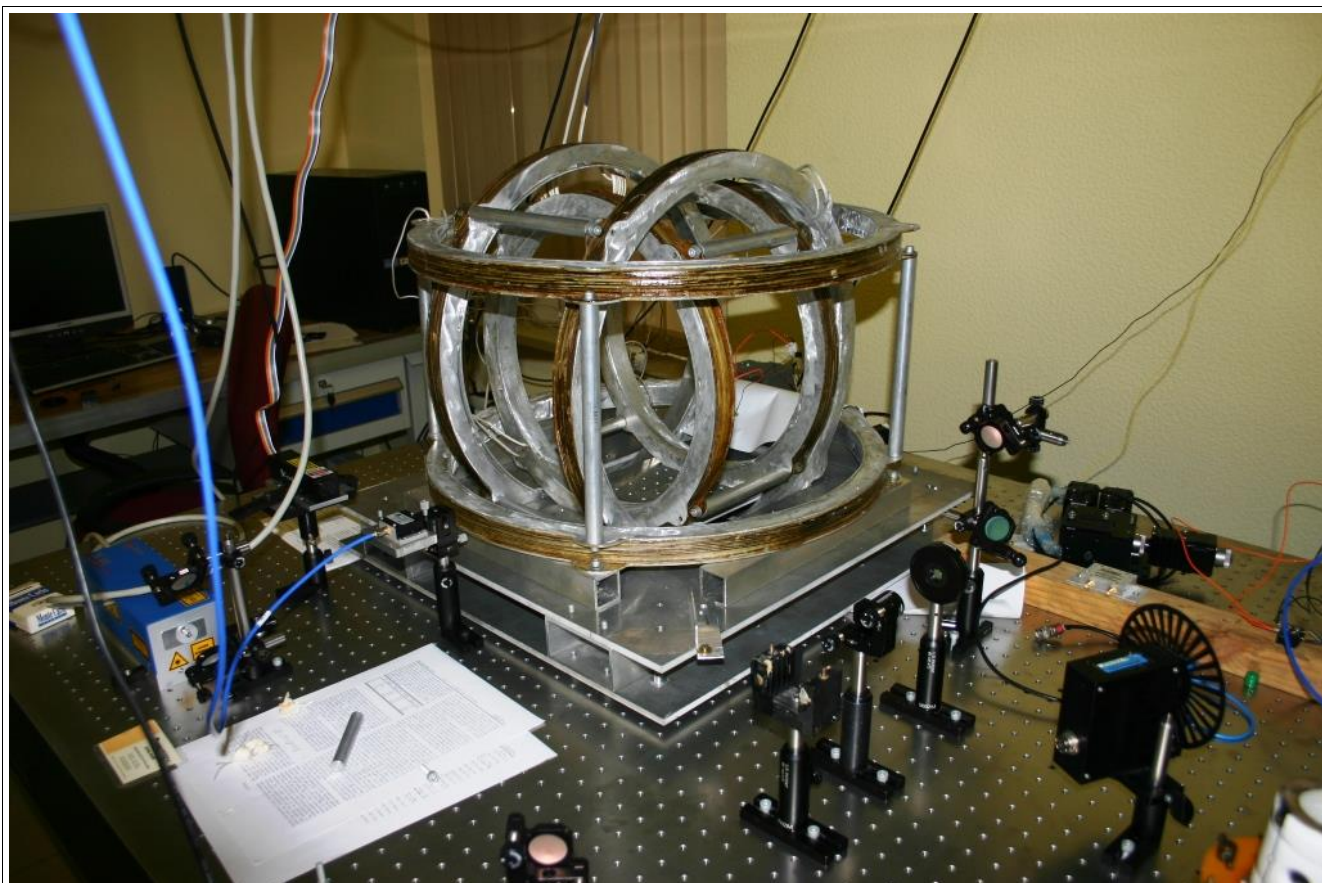
Rīga, 2013.g. maijs

Saturs

Ievads	3
Helmholca spoles	4
Nanopozicionēšanas galdiņš un tā kontrolieris	8
Nanoizmēru šūna un tās krāsns	10
Cs D1 lāzers un kontrolieris	11
Magnētiskais ekrāns	12
Elektronika	13
Secinājumi	14

Ievads

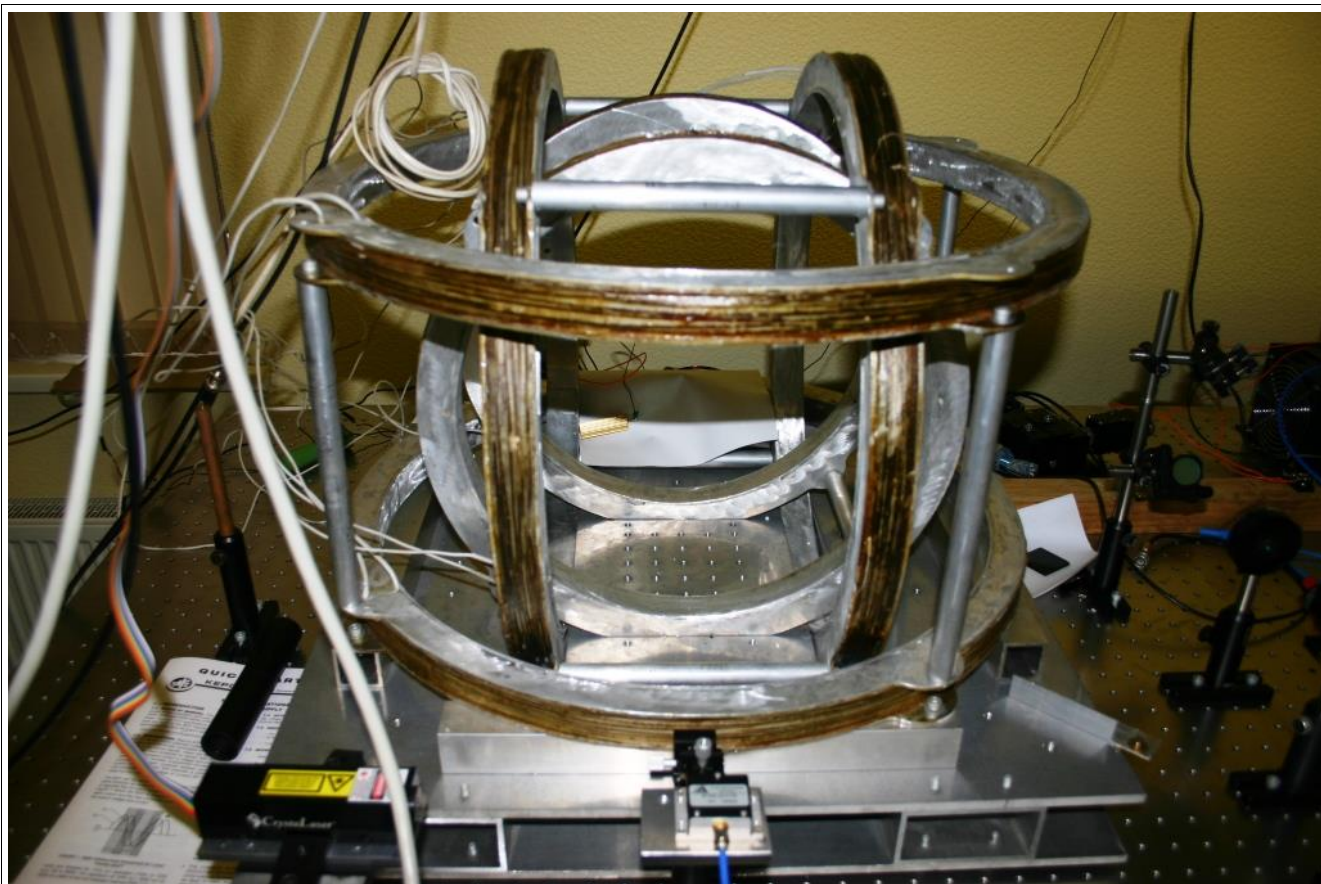
ERAF projekta “Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai izmantojot nanostrukturētu atomārās gāzes vidi” (Nr. 2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/036) ietvaros izveidots laboratorijas modeļa prototips magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai. Modeļa prototips novietots uz nemagnētiska optiskā galda (sk. 1.attēlā). Virs galda ir novietotas elektronikas iekārtas, kas nodrošina magnētiskā lauka veidošanu, iekārtu kontroli un datu izlasi. Uz galda novietots jauns Helmholca spoļu komplekts, kas īpaši izgatavots projekta vajadzībām un nodrošina kontrolējamu magnētisko lauku no 0 līdz apmēram 100 Gausiem. Helmholca spoļu centrā atrodas krāsns ar nanoizmēru šūnu, kas novietota uz nanopozicionēšanas galda. Šajā dokumentā tālāk tiek aprakstītas modeļa laboratorijas prototipa atsevišķas sastāvdaļas.



1.attēls. Modeļa laboratorijas iekārta.

Helmholca spoles

Helmholca spoles ir ērts veids, kā radīt kontrolējamu magnētisko lauku. Komplekts sastāv no divām spolēm, kas novietotas uz vienas ass, un kuru attālums ir vienāds ar vijumu rādiusu. Šādu konfigurāciju sauc par Helmholca konfigurāciju, un tai piemīt ļoti izdevīgas īpašības, kas ļauj radīt vai nu ļoti vienmērīgu (homogēnu) magnētisko lauku, vai stipru magnētiskā lauka gradientu. Projekta ietvaros tika izgatavots jauns Helmholca spoļu komplekts, kas, izmantojot laboratorijā iegūto pieredzi ar citām spolēm, ir piemērotas tieši realizējamā projekta vajadzībām. Jaunās Helmholca spoles ir izvietotas uz alumīnija plāksnes ar caurumiem ar M6 vītņi, kas ļauj piestiprināt optiskās komponentes. Turklāt, spoles veidotas daudz atvērtākas, kas pieļauj vairāk vietas iekārtu izvietošanai. Spoles ir attēlotas 2.attēlā.



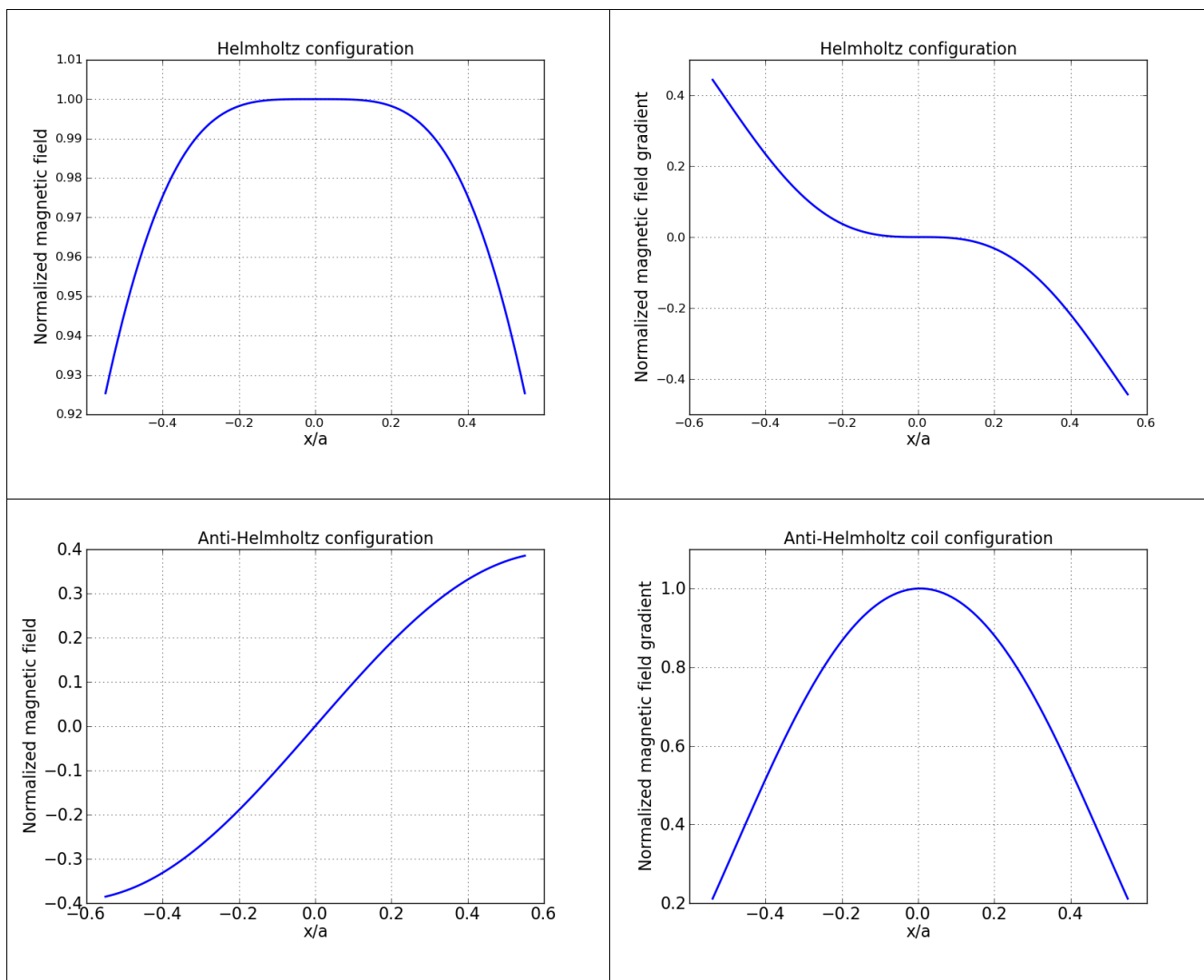
2.attēls. Helmholca spoles (prototipa iekārtai paredzētais kopmplekts)

Helmholca spoles pazīstamas ar to, ka var veidot ļoti vienmērīgu magnētisko lauku. Attēls 3(a) rāda normalizēto magnētisko lauku gar spoļu asi atkarībā no pozīcijas gar x asi, kad spoles ir pieslēgtas Helmholca konfigurācijā, tas ir, strāva abās spolēs plūst tādā virzienā, ka magnētiskā lauka vērtības summējas spoļu vidū. (Pozīcija gar x asi ir normētā uz spoļu

rādiusu a , jo komplektā ir 3 spoles ar 3 atšķirīgiem rādiusiem.) Kā redzams, magnētiskais lauks ir diezgan vienmērīgs, ja a/r parametrs atrodas starp -0.1 un $+0.1$. Attēls 3(b), kas rāda magnētiskā lauka gradientu, kas saistīts ar attēlu 3(a) apstiprina, ka lauks ir ļoti vienmērīgs spoļu vidū: gradients ir nulle vai ļoti tuvu nullei iepriekš minētajā a/r diapazonā. Kopīgo magnētiskā laukā lielumu var kontrolēt, mainot strāvu spolēs. Parasti tas tiek izdarīts ar Kepco BOP-50-8 bipolāro barošanas bloku, kas ir vadāms gan manuāli, gan padodot spriegumu no funkciju ģenerators vai no datora. Mūsu gadījumā ir sasniedzamas lauka vērtības starp nulli un ± 100 Gausiem.

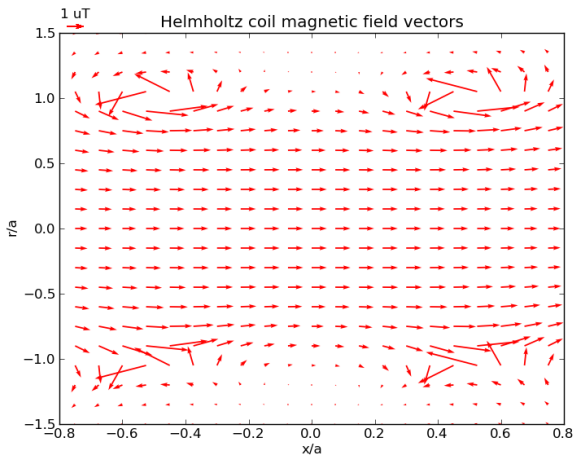
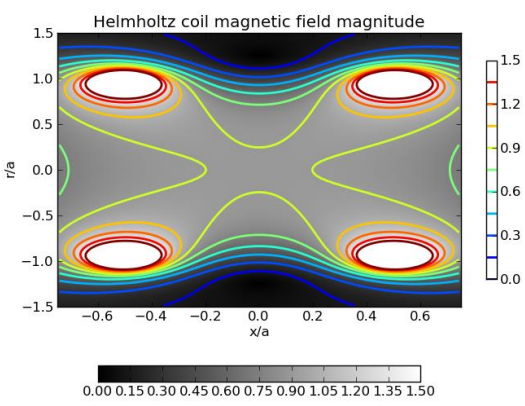
Ja nepieciešams magnētiskais lauks ar gradientu spoļu vidū, tad var izmantot tā saukto anti-Helmholca konfigurāciju, kur strāvas virziens vienā spolē tiek mainīts. Tad tiek radīts magnētiskais lauks gar spoļu asi, kas ir attēlots attēlā 3(c). Kā redzams attēlā, spoļu vidū magnētiskā lauka vērtība ir nulle, bet tā strauji mainās, mainoties x koordinātei. Magnētiskā lauka gradients ir parādīts attēlā 3(d), kur redzams, ka maksimālais gradients atrodas tieši pie $x=0$, tas ir, pa vidū starp spolēm.

	<i>Iekšējā spole</i>	<i>Vidējā spole</i>	<i>Ārējā spole</i>
Rādiuss [mm]	187,50	232,50	227,50
Vijumu skaits	225	225	225
Vada diametrs [mm]	1,5	1,5	1,5
Vada pretestība [$\square$]	5,3	6,5	8,1
Spriegums [V]	53,4	64,8	50,0
Strāva [A]	10,0	10,0	6,2
Jauda [W]	534	648	811
Magnētiskais lauks pa vidu [G]	105	87	74

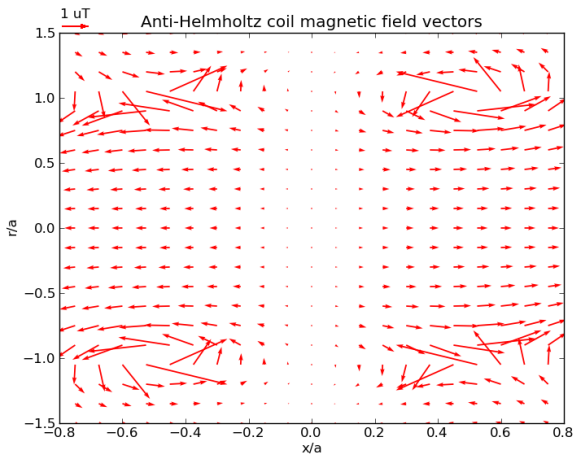
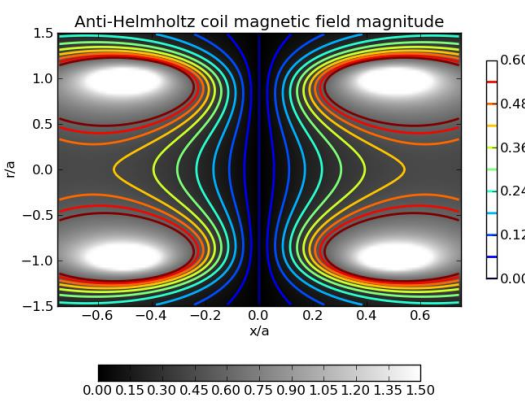


3.attēls. Magnētiskais lauks un tā gradients Helmholca un anti-Helmholca konfigurācijās.

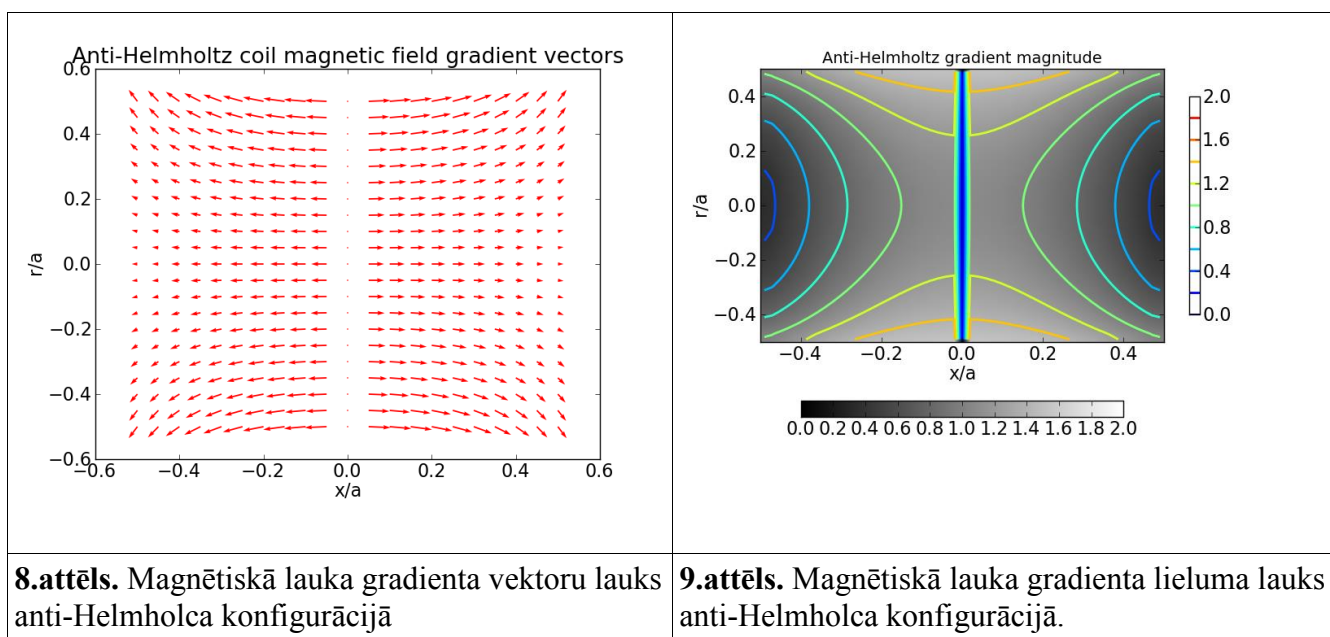
Nepieciešams zināt arī Helmholca spoļu radīto lauku punktus, kas neatrodas uz ass starp spolēm. Helmholca konfigurācijai magnētiskā lauka virzieni atkarībā no divdimensionālās pozīcijas ir parādīti 4.attēlā, bet magnētiskā laukā lielums - 5.attēlā. Bultiņu garums 4.attēlā ir saistīts ar magnētiskā lauka vērtību konkrētā pozīcijā, bet bultiņu virziens rāda magnētiskā lauka virzienu. Var redzēt, ka viena spole atrodas pie $x/a = -0.5$, bet otra spole - pie $x/a = 0.5$. Spoles šķeļ attēla plakni pie $r/a = \pm 1.0$, kur 5.attēlā parādīti balti elipsoīdi, kas liecina par to, ka magnētiskā lauka vērtība strauji aug, tuvojies spolēm, kur plūst strāva.

	
4.attēls. Helmholca spoļu magnētiskā lauka vektoru lauks Helmholca konfigurācijā.	5.attēls. Helmholca spoļu magnētiskā lauka lielums Helmholca konfigurācijā.

Kā minēts iepriekš, magnētiskus laukus ar gradientu var radīt ar Helmholca spolēm, slēdzot tās anti-Helmholca konfigurācijā - nomainot strāvas virzienu vienā no spolēm. Rezultējošais magnētiskais lauks ir attēlots 6.attēlā un 7.attēlā. Attēlos redzams, ka pie $x = 0$ pazūd magnētiskais lauks. Tomēr, pie negatīvām x vērtībām magnētiskā lauka vektori ir orientēti uz negatīvo pusi, bet kad $x > 0$ – uz pozitīvo pusi. Kontūrlīnijas, kas ir zīmētās 7.attēlā, definē punktus, kuriem ir vienāda magnētiskā lauka vērtība. Magnētiskā lauka gradients vienmēr ir virzienā, kas ir perpendikulārs kontūrlīnijām.

	
6.attēls. Magnētiskā lauka vektoru lauks anti-Helmholca konfigurācijā.	7.attēls. Magnētiskā lauka lielums anti-Helmholca konfigurācijā

Magnētiskā lauka gradients ir attēlots 8.attēlā vektoru formā, bet 9.attēlā – ar kontūrlīnijām.



Nanopozicionēšanas galdiņš un tā kontrolieris

Nanoizmēru šūna kļūst vairāk vai mazāk caurspīdīga atkarībā no magnētiskā lauka un, iespējams, arī atkarībā no radiofrekvences lauka, ja šāda radiofrekvence tiek izmantota. Tādi magnetooptiskie signāli tiek izmantoti, lai mērītu magnētisko lauku. Lai mērītu magnētiskā lauka gradientu, ir jāmēra magnētiskais lauks vismaz divās pozīcijās. Lai telpiskā izšķirtspēja varētu sasniegt nanometru kārtu, iekārtai ir jābūt spējīgai mainīt pozīciju ar tādu izšķirtspēju. Līdz ar to, šūna tiek piestiprināta uz MAX 341 nanopozicionēšanas galdiņa no *Thorlabs*. Šis galdiņš var sasniegt telpisko izšķirtspēju līdz 5 nm, izmantojot pjezo kristālu, ar atkārtotamību līdz 50 nm. Darbības princips balstīts uz pjezokristāla īpašību, ka tā izmēri ir atkarīgi no pieliktā sprieguma. Kristālam tiek pielikts spriegums starp 0 V un 75 V, kas bīda galdiņu par dažiem nanometriem x -, y - vai z -virzienā, kristāla izmēriem mainoties sprieguma ietekmē. Attiecība starp spriegumu un pozīciju ir 267 nm/V. Galdiņš ir redzams 10.attēlā, bet tā kontrolieris (*Thorlabs* BPC 303) – 11.attēlā.

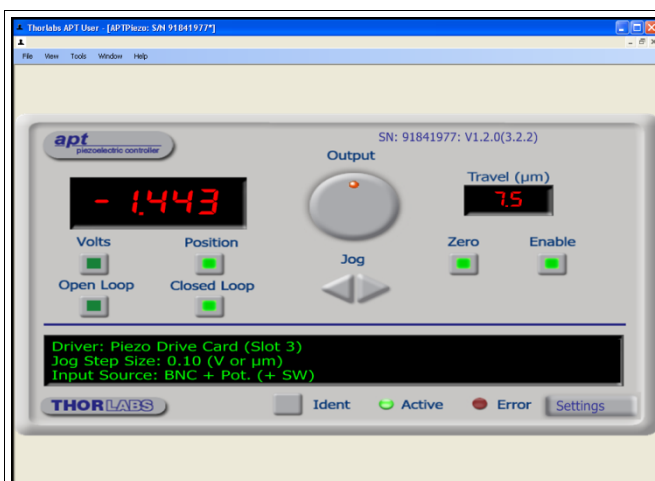


10.attēls. Nanopozicionēšanas galdiņš

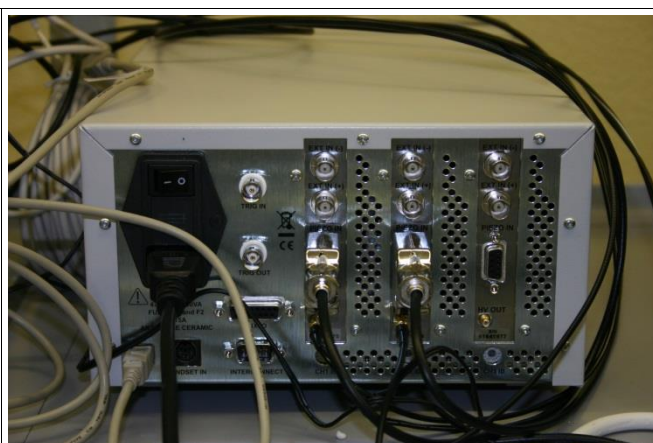


11.attēls. Nanopozicionēšanas galdiņa kontrolieris

Pjezo kontrolieris ļauj mainīt galdiņa pozīciju, griežot pogu uz paša kontroliera, izmantojot grafisko lietotāju interfeisu APT programmatūrā (sk. 12.attēlā), vai pievadot analogu signālu. Analoga signāla gadījumā kontrolieris strādā kā pastiprinātājs, kas pārveido kontroles signālu robežās starp 0 V un 5 V pjezo vadošā signālā ar sprieguma vērtībām starp 0 un 75 V. Šādu signālu var pievadīt, izmantojot BNC savienojumu ar jebkuru no 3 kanāliem izejā “EXT IN (-)” vai “EXT IN (+)” (sk. 13.attēlā). Tajā attēlā redzami arī tievi melni vadi (lejā), kas padod spriegumu pjezo kristālam, un resnāki melni vadi ar D-tipa savienojumiem, kas dod informāciju par pjezo esošo pozīciju. Redzams arī baltais USB vads savienojumam ar datoru.



12.attēls. APT programmatūras (*Thorlabs*) grafiskais lietotāju interfeiss pjezo galdiņa kontrolei.



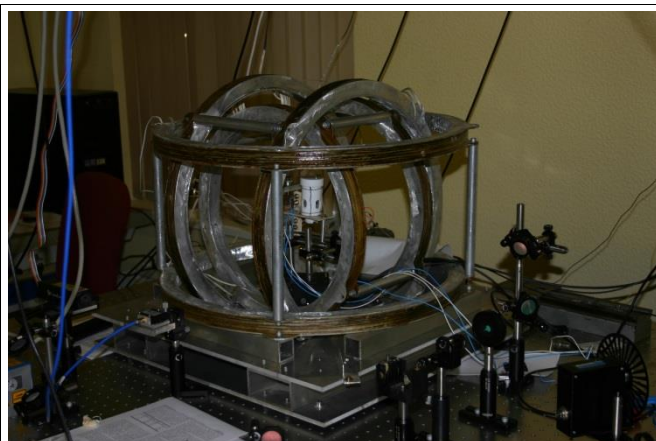
13.attēls. Pjezo kontroliera savienojumi aizmugures daļā.

Nanoizmēru šūna un tās krāsns

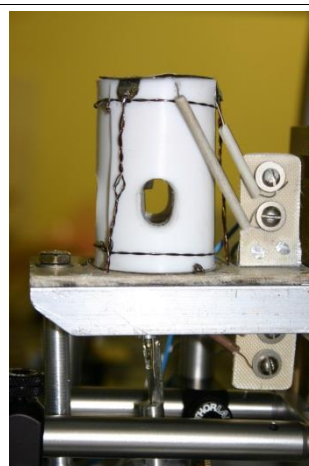
Nanoizmēru šūna ierobežo sārnu metālu tvaiku slāni mazā telpas apgabalā, kas ir no 150 līdz 1000 nm biezš. Tādā veidā tiek sasniegta nanometriskā telpiskā izšķirtspēja, jo novērojot magnetooptiskus efektus no gāzes slāņa var secināt, ka signāli rodas tikai konkrētajā telpiskajā apgabalā, un ka signālu īpašības nosaka magnētiskais lauks šajā telpiskajā apgabalā. Sārnu metālu tvaiku slānis tiek ierobežots starp diviem YAG kristāliem (logi), kas ir mazliet slīpi piestiprināti viens pret otru, kā rezultātā slāņa biezums mainās atkarībā no pozīcijas gar logu. Zem YAG kristāliem ir caurulīte, kas pildīta ar sārnu metālu, tādējādi veidojot sārnu metālu rezervuāru. Sārnu metālu tvaiku spiedienu starp YAG logiem var regulēt, regulējot rezervuāra temperatūru. Tādēļ šūna ir ievietota krāsnī, ko var sildīt ar sildīšanas vadiem, kas pievienoti barošanas blokam. Jāņem vērā, ka sārnu metālu tvaiki vienmēr tiecas kondensēties šūnas aukstākajā daļā. Līdz ar to, ir jānodrošina, ka logu temperatūra ir augstāka nekā rezervuāra temperatūra, jo pretējā gadījumā, metāls kondensēsies pie loga, un logs kļūs necaurspīdīgs. Tāpēc krāsnij ir divas atsevišķas daļas, kuru temperatūru var regulēt atsevišķi: augstākā daļa logam, bet zemākā daļa - rezervuāram. Krāsns ir attēlota 12.attēlā.

Lai mēritu temperatūru krāsnī, tiek izmantoti hromela-alumela (*K*-tipa) termopāri. Tie dod spriegumu, kas ir atkarīgs no temperatūras starpības starp termopāra vadiem ar attiecību: $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Spriegumu var nolasīt ar parasto multimetru. Tiek izmantoti divi termopāri - viens, lai mēritu temperatūra pie metālu rezervuāra, bet otrs – pie loga.

Lai pārbaudītu šūnas darbību, tā tiek novietota Helmholca spoļu vidū, kā redzams 13.attēlā. Melnā platforma lejā ir MAX341 nanopozicionēšanas galdiņš. Uz galdiņa ir stieņu konstrukcija, kas notur krāsni, kurā tiek ievietota nanoizmēru šūna. Baltie un zilie vadi kalpo savienošanai ar barošanas bloku.



12.attēls. Nanoizmēru šūnas montēšana Helmholca spolēs.



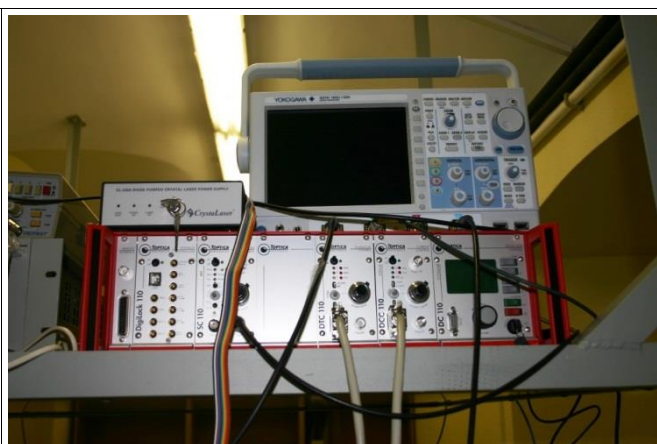
13.attēls. Nanoizmēru šūnas krāsns ar sūnu Helmholca spoļu vidū.

Cs D_1 Lāzers un kontrolieris

Magnetooptiskos signālus nevar radīt bez gaismas avota. Lāzers ir ideāls gaismas avots, jo dod koherentu gaismu ar stabilu intensitāti pie noteikta viļņa garuma. Tā kā nanoizmēru šūnā atrodas cēzija tvaiki, tiek izmantots lāzers, kas dod starojumu ar viļņu garumu ap 852 nm, kas atbilst cēzija D_1 līnijai (sk. 14.attēlā). (Lāzera kontrolieris ir attēlots 15.attēlā.) Cēzija D_1 pāreja ir ļoti piemērota magnētiskā lauka mērīšanai, jo visas supersīkstruktūras komponentes var viegli izšķirt (sk. 16.attēlā). Tiek izmantots lāzers, kam pamatā ir DFB (*distributed feedback*) lāzera diode, jo šādai diodei jau ir iekļauts režģis, kas ļauj izvēlēties vienu precīzu frekvenci atkarībā no strāvas vai no temperatūras. Starp DFB lāzeru labajām īpašībām ir tas, ka var viegli skenēt frekvenci lielā diapazonā bez moda lēcieniem. Līdz ar to, 16.attēla dati uzņemti ar vienu lāzera strāvas skenu gar 12 GHz bez modu lēcieniem, un lāzers ir spējīgs skenēt līdz pat 1000 GHz bez modu lēcieniem.

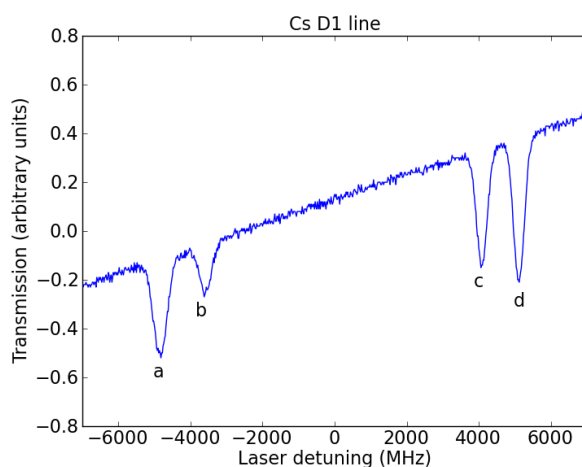


14.attēls. DFB lāzers cēzija D_1 līnijai.



15. attēls. Lāzera kontrolieris un oscilogrāfs.

Skens tiek realizēts, mainot lāzera strāvu ar SC 110 skena ģeneratoru (sk. 15.attēlā), kas ir iekšēji savienots ar DCC110 strāvas kontrolieri. Jāatzīmē, ka DFB lāzers ir ļoti stabils, un tas ļoti atvieglo darbu un vienkāršo stabilizēšanas problēmu. Iepriekš tika izstrādātas stabilizēšanas metodes tradicionālākajiem ECDL (*extended cavity diode laser*) lāzeriem, bet izrādījās, ka DFB lāzers ir pietiekoši stabils pats par sevi. Nepieciešamības gadījumā to ir iespējams papildus stabilizēt, izmantojot kontroliera Digilock 110 moduli (sk. 15. attēlā).



16.attēls. Gaismas intensitāte šūnas izejā atkarībā no lāzera frekvences. Katrs pīķis atbilst vienai pārejai: (a) atbilst $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$ pārejai, (b) – $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$ pārejai, (c) – $F_g = 4 \rightarrow F_e = 4$ pārejai, bet (d) – $F_g = 4 \rightarrow F_e = 3$ pārejai.

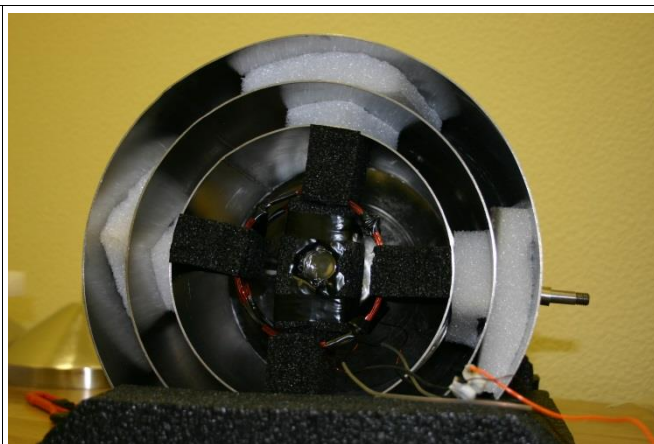
Magnētiskais ekrāns

Ar laboratorijas prototipa iekārtu ir iespēja veikt mērījumus pie zemas magnētiskā lauka intensitātes, bet laboratorijas lauka lielums ir ap 1 G. Turklāt, tas var laikā mainīties atkarībā no strāvām, kas plūst laboratorijā. Tādu laboratorijas magnētisko lauku var kompensēt ar Helmholca spolēm, tomēr, ja mainās laboratorijas lauks, tad strāva spolēs arī ir jāmaina, un tas prasa sarežģītu kontroles sistēmu. Vienkāršākais veids, kā iegūt mazu lauku, ir ekranēt laboratorijas lauku un citus nevēlamus laukus. To var darīt ar magnētisku ekrānu (sk. 17.attēlā), kas izgatavots no tā sauktā mī-metāla (niķeļa sakausējums ar lielu magnētisko uzņēmību). Katrs slānis samazina magnētiskā lauka lielumu apmēram 30 reizes. Līdz ar to, ar

trijiem slāņiem ir iespējams sasniegt magnētiskā lauka vērtības, kas mazākās par 1 mG ekrāna iekšienē (sk. 18.attēlā).



17.attēls. Magnētiskais ekrāns.



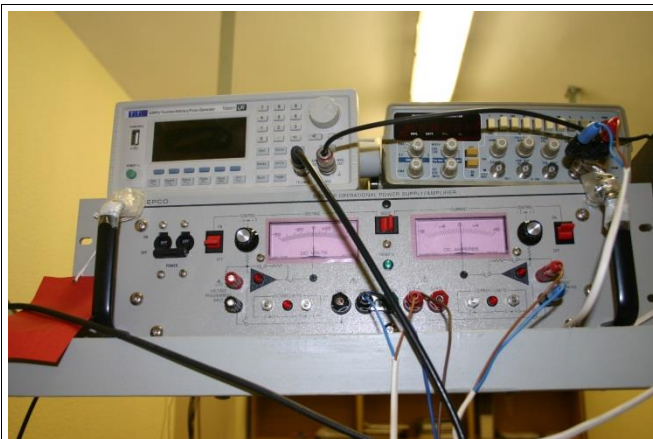
18.attēls. Magnētiskajā ekrāna iekšiene ar RF spole un sūnu.

Elektronika

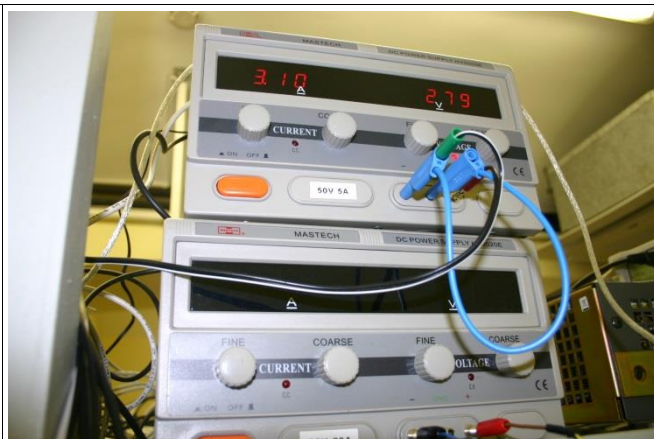
Eksperimenti ar laboratorijas prototipa iekārtu nebūtu iespējami bez virknes elektronisku iekārtu. Starp nepieciešamajām iekārtām ir:

- funkciju ģeneratori, kas sintezē signālus, lai vadītu, piemēram, strāvu, kas plūst caur spolēm, radot magnētisko lauku, pārvieto pjezo galdu vai arī ģenerē radiofrekvences (RF) lauku ar mazu RF spoļu palīdzību (sk. 19. attēlu);
- barošanas bloki, ar kuru doto strāvu tiek radīts magnētiskais lauks;
- fotodiodes signāla detektēšanai ar pastiprinātāju;
- lock-in pastiprinātāji vāju signālu uz liela trokšņaina fona pastiprināšanai;
- oscilogrāfs signālu iegūšanai.

Liela daļa elektronikas iekārtu jau bija mūsu laboratorijas rīcībā pirms projekta uzsākšanas vai ir iegādātas no citiem līdzekļiem. Dažas iekārtas, piemēram, *Thorlabs* PDA36A fotodiodes, tika iegādātas projekta ietvaros. Iekārtas tika pārbaudītas un savienotas atbilstoši laboratorijas prototipa realizēšanas vajadzībām.



19.attēls. Funkciju ģeneratori TG5011 (augšā pa kreisi) un *Voltcraft* (augšā pa labi) un bipolārais strāvas avots *Kepco* BOP-50-8M (lejā), kas dod Helmholca spolēm strāvu, ar kuru var skenēt magnētisko lauku.



20.attēls. Barošanas bloki, kas dod strāvu divām Helmholca spolēm, ar kuru tiek kompensēts laboratorijas lauks. Strāvu var izmantot arī, lai sildītu nanoizmēru šūnas krāsni.

Secinājumi

Tika izgatavots magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanas moduļa laboratorijas prototips, kā pārredzēts ERAF 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.

Laboratorijas modeļa prototips ir uzstādīts uz nemagnētiskā galda. Modeļa prototips balstās uz nanoizmēru sārmu metālu tvaiku slāni, kas atrodas nanoizmēru šūnā. Magneto-optiskie signāli, kas iegūti ar šūnas palīdzību kalpo, lai mērītu magnētisko lauku. Šūna ir piestiprināta pie nanopozicionēšanas galdiņu, kas nodrošina iespēju mērīt magnētiskā lauka gradientus. Helmholca spoles nodrošina magnētisko lauku ar gradientu vai bez gradienta, modeļa prototipa pārbaudei.

Tika izgatavots magnētiskais ekrāns, kas ļauj pārbaudītu šūnas zema magnētiskā lauka vidē. Elektronikas iekārtas nodrošina iekārtas vadīšanu un signālu iegūšanu. Iegūtā pieredze tiks izmantota izstrādājot prototipu uz mazākas pārvietojamas iekārtas.

