

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**PLĀNO KĀRTIŅU MAGNĒTISKO ĪPAŠĪBU IZPĒTE,
IZMANTOJOT SLĀPEKĻA VAKANČU CENTRUS DIMANTA
KRISTĀLĀ**

BAKALAURA DARBS

Autors: **Artūrs Smilnieks**

Studenta apliecības Nr.: 16178

Darba vadītājs: Dr. Phys. Andris Bērziņš

RĪGA 2019

Anotācija

Šajā darbā tiek izmantota magnētiskā lauka attēlošanas metode, kas balstās uz plānu slāpekļa vakancu krāsu centru slāni dimanta kristālā. Metodes pamatā ir optiski detektētas magnētiskās rezonanses mērījumi, kas sniedz informāciju par divdimensionālu magnētiskā lauka sadalījumu. Pētāmie objekti ir magnētiskas plānas kārtiņas, kurām tiek mērīts magnētiskā lauka sadalījumu, identificējot magnētiskā lauka īpašības un magnētiskus defektus. Pētāmās plānās kārtiņas veidotas no dažādiem ķīmiskajiem elementiem un to kombinācijām, kas ļauj mērījumu procedūru pārbaudīt gan uz relatīvi spēcīgām, gan relatīvi vājām magnētiskām struktūrām. Tā pat tiek novērtēta magnētisko struktūru korelācija ar struktūrām, kas detektējamas ar optiskām metodēm. Šī darba ietvaros tiek uzlabota arī eksperimentālā iekārta, nodrošinot labāku un korektāku rezultātu iegūšanu un apstrādi.

Atslēgasvārdi: slāpekļa vakances krāsu centri, NV centrs, magnētiskais lauks, plānās kārtiņas.

Abstract

In this research a thin layer of nitrogen- vacancy color centers in diamond crystal is used to obtain magnetic field images. The method is based on optically detected magnetic resonance measurements which provides two-dimensional information about the magnetic field distribution. Objects of interest are magnetic thin films - by obtaining magnetic field images one can identify the magnetic field properties and magnetic defects. Studied thin films are made from different chemical elements and different combinations of them which provides a testing ground for the experimental system at relatively strong and relatively weak magnetic fields. The correlation between the magnetic images and images obtained by optical methods is also determined. Within the framework of this work the experimental set-up is improved, providing better results and more accurate processing of the acquired data.

Keywords: nitrogen vacancy color centers, NV center, magnetic field, thin films.

SATURA RĀDĪTĀJS

SATURA RĀDĪTĀJS	4
1. APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	5
2. IEVADS	6
2.1. Motivācija	6
2.2. Darba mērķis un uzdevumi:	6
2.3. Autora ieguldījums:	7
3. TEORĒTISKĀ DAĻA	8
3.1. Slāpekļa vakances centrs dimanta kristālā.....	8
3.2. NV centru enerģētiskā shēma	9
3.3. NV centru manipulācijas ar ārējiem laukiem.....	11
3.4. Optiski detektējamās magnētiskās rezonanses.....	12
4. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	17
4.1. Eksperimentālā iekārta.....	17
4.2. Eksperimentālās metodikas.....	19
4.3. Eksperimentā izmantotais dimants ar NV centriem.....	22
5. REZULTĀTI.....	23
6. SECINĀJUMI	33
7. PATEICĪBAS.....	34
8. IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI.....	35
9. DOKUMENTĀRĀ LAPA	38

1. APZĪMĒJUMU SARAKSTS

NV centrs – slāpekļa vakances centrs

LIF – lāzera inducētā fluorescence

ODMR – optiski detektējamās magnētiskās rezonances

EPR – elektronu paramagnētiskās rezonances

ESR – elektronu spina rezonances

A_0 – LIF fona signāla līmenis

B – magnētiskā lauka indukcija

C – intensitātes kontrasts

S – elektrona spina kvantu skaitlis

I – kodola spina kvantu skaitlis

m_s – elektrona spina magnētiskais kvantu skaitlis

D_g – pamatstāvokļa nulles lauka šķelšanās dipolu mijiedarbība dēļ

D_e – ierosinātā stāvokļa nulles lauka šķelšanās dipolu mijiedarbība dēļ

ν – frekvence

μ_B – Bora magnetons

g_e – Landē faktors

γ – žiromagnētiskais parametrs

λ – viļņa garums

2. IEVADS

2.1. Motivācija

Pēdējos gados palielinās potenciālais pielietojums slāpekļa vakanču (NV) krāsu centriem dimantā tādās nozarēs kā materiālzinātnē, kvantu skaitļošanā [1], astronomijā [2], medicīnā [3] un citās nozarēs, kur nepieciešams veikt augstas precizitātes magnētiskā lauka [4], elektriskā lauku [5], temperatūras [6] un leņķiskā momenta [7] mērījumus. Par to liecina liels pieaugumu skaits publicēto zinātnisko rakstu saistībā ar NV centru izpēti.

Tas, kas padara NV centrus ērti izmantojamus iepriekš minēto mērījumu veikšanai, ir to plaši raksturotā enerģētiskā struktūra dimanta aizliegtajā zonā. Ar NV centriem ir iespējams mērīt nanoteslu stiprus magnētiskos laukus ar augstu telpisko izšķirtspēju [8]. No mērījumiem var ne tikai noteikt magnētiskā lauka amplitūdu, bet arī virzienu. Optiski detektējamās magnētiskās rezonances (ODMR) priekštecis ir elektronu paramagnētiskās rezonances metode. Metodes ir balstītas uz pāreju detektēšanu starp elektronu magnētiskajiem apakšlīmeņiem.

Plāno kārtiņu izmantošana zinātnē un tehnoloģijās pieaug ar katru gadu, un līdz ar to palielinās plāno kārtiņu īpašību noteikšanas nozīme. Izmantojot NV centrus plāno kārtiņu pētīšanā netiek veiktas manipulācijas ar pašu plāno kārtiņu, izņemot ārēja magnētiskā lauka pielikšanu. ODMR metode ir daudz parocīgāka metode plāno kārtiņu magnētisko lauku pētīšanā nekā izmantojot sārnu tvaiku šūnas, SQUID vai Holla zondi. Būtiski ir izveidot eksperimentālo iekārtu, ar kuru ir iespējams ātri un efektīvi veikt plāno kārtiņu izpēti, kas sniedz ne tikai augstu magnētiskā lauka jūtību, bet arī augstu telpisko izšķirtspēju. Vēl viena svarīga funkcija, ko jāveic eksperimentālajai iekārtai, ir spēja uzņemt optisko attēlu, lai varētu veikt magnētisko lauku attēlu salīdzināšanu ar optiski detektējamiem defektiem.

2.2. Darba mērķis un uzdevumi:

Šī darba mērķis ir izveidot eksperimentālo sistēmu un veikt mērījumus, kā arī datu apstrādi, lai iegūtu divdimensionālu magnētisko lauku sadalījumu, izmantojot slāpekļa vakanču krāsu centru

slāni dimanta kristālā kā magnētiskā lauka zondi. Šādas sistēmas izveides mērķis ir radīt augstas caurlaidspējas magnētiskā lauka mērīšanas iekārtu ar augstu telpisko izšķirtspēju.

Darba uzdevumi:

1. Piedalīties eksperimentālās iekārtas izveidē un uzlabošanā
2. Veikt magnētiskā lauka attēlošanas eksperimentālos mērījumus
3. Veikt iegūto datu apstrādi un korelēt magnētiskos attēlus ar optiskajiem

2.3. Autora ieguldījums:

Darba autors patstāvīgi veicis plāno kārtiņu magnētiskā lauka īpašību izpēti, t.i. sameklēta interesējoša pozīcija uz plānās kārtiņas, uzņemts optiskais attēls, veikta magnētiskā lauka uzņemšana - ODMR sadalījuma iegūšana, salīdzināti abi iegūtie attēli. Autors ir piedalījies eksperimentālās iekārtas izveidē un uzlabošanā, kā arī izgatavojis parauga turētāju.

Konferenču tēzes:

LU 77. starptautiskās zinātniskās konferences sekcijas sēde 08.02.2019 "Lāzeru centra pētījumi kvantu un nanotehnoloģiju, kā arī astrofizikas virzienos", **A. Smiltnieks, M. Auziņš, A. Bērziņš, R. Ferbers, A. Petruhins, J. Rosén, J. Šmits** "Plānu kārtiņu magnētisko īpašību pētījumi izmantojot NV centrus dimanta kristālā".

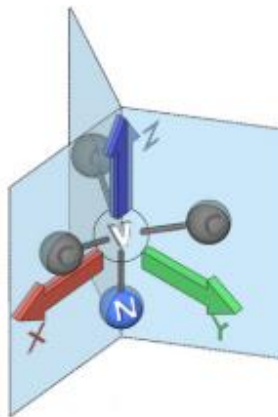
Developments in Optics and Communications 2019 konference 11.04.2019, **A. Smiltnieks, A. Bērziņš, J. Šmits, M. Auziņš, R. Ferbers**, - "Detection of magnetic thin film impurity phases using nitrogen vacancy centers in diamond crystal".

Darbs sastāv no teorētiskās daļas - aprakstīta NV centru uzbūve, struktūra, to mijiedarbība ar ārējiem laukiem un izmantotās metodikas teorija; eksperimentālās daļas – aprakstīta izmantotā eksperimentālā iekārta, datu apstrāde; rezultātu daļas.

3. TEORĒTISKĀ DAĻA

3.1. Slāpekļa vakances centrs dimanta kristālā

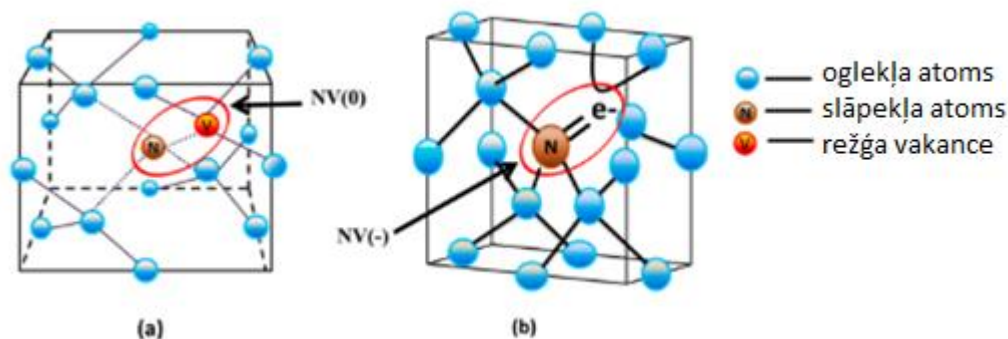
NV krāsu centrs dimanta kristālā ir punktveida defekts kristāliskajā režģī. Defekts rodas, kad kāds no kristāliskā režģa oglekļa atomiem ir aizvietots ar slāpekļa atomu, un tam blakus atrodas kristāliskā režģa vakance. Dimanta kristāliskā režģa struktūra nodrošina C_{3v} simetriju arī NV centra defektam. Tetraedrālās uzbūves dēļ ir iespējamas četras NV centra orientācijas kristāliskajā režģī, un katra orientācija, jeb ass, kas iziet cauri slāpeklim un vakancei, tiek uzskatīta par dabiskām kvantēšanas asīm (attēls 3.1.1). [9]



Attēls 3.1.1: NV centra defekta struktūra, tostarp galvenā simetrijas ass Z, un tās atspoguļojuma plaknes [9].

Slāpekļa atomam ir pieci valences elektroni, trīs no tiem veido kovalentās saites ar apkārtējiem oglekļa atomiem, atlikušie divi elektroni veido nesaistītu elektronu pāri (*lone pair*). Režģa vakancē atrodas trīs nesaistīti elektroni, kuri iegūti no apkārtējiem oglekļa atomiem. Divi no šiem elektroniem veido kvazi-kovalento (*quasi-covalent*) saiti [10] un trešais elektrons paliek nesaistīts. Šāda elektronu konfigurācija atbilst neitrāli lādētam NV krāsu centram, un tā paramagnētiskās īpašības izriet no nesaistītā vakances elektrona. Negatīvi lādētā NV krāsu centra gadījumā viens no slāpekļa nesaistītā elektrona pāra elektroniem izveido donorsaiti ar atsevišķo, nesaistīto vakances elektronu [11]. Neitrāli lādētie NV krāsu centri ir magneto-optiski (*magneto-*

optically) neaktīvi [11], šī iemesla dēļ spektroskopijas pētniecībā tiek pētīti tikai negatīvi uzlādētie NV krāsu centri, NV^- , tādēļ turpmāk tekstā ar apzīmējumu NV tiks saprasts NV^- .



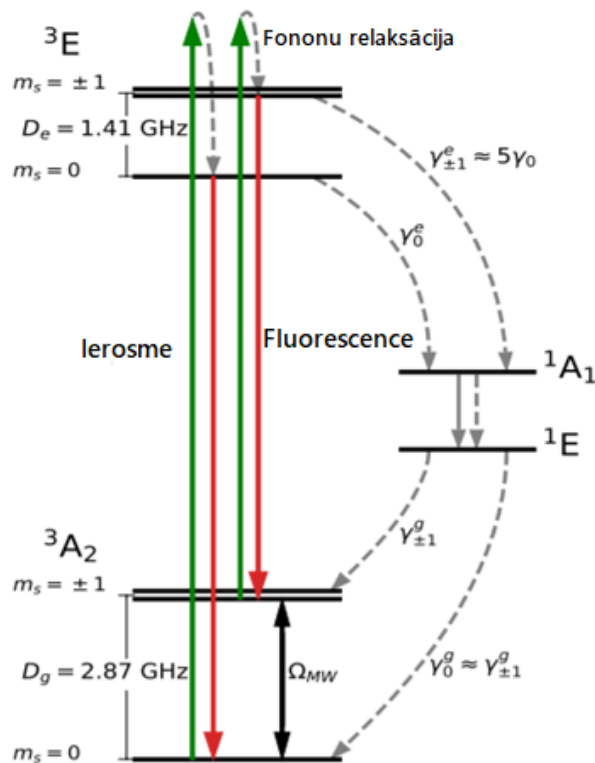
Attēls 3.1.2: Shematiskā struktūra a) NV^0 krāsu centram un b) NV^- krāsu centram dimanta kristāliskajā režģī [11].

3.2. NV centru enerģētiskā shēma

NV centra vakances elektronu pāris – nesaistītais elektrons no oglekļa un donor elektrons no slāpekļa, veido kopējo spinu ar vērtību $S = 1$, tātad tam pamatstāvoklī eksistē trīs magnētiskie apakšlīmeņi $m_s = 0; -1; +1$. Bez pielikta ārējā magnētiskā lauka, magnētiskie apakšlīmeņi $m_s = \pm 1$ ir deģenerātā stāvoklī, to enerģijas ir vienādas. Pastāv enerģijas starpība starp apakšlīmeņiem $m_s = 0$ un $m_s = \pm 1$ dipola – dipola mijiedarbības dēļ, un šī enerģijas starpība ir $D_g = 2.87$ GHz, kas atbilst mikroviļņu diapazonam. NV centra ierosinātā stāvokļa uzbūve ir līdzīga pamatstāvoklim, vienīgā atšķirība ir dipola – dipola mijiedarbības spēks starp $m_s = 0$ un $m_s = \pm 1$ komponentē, šī mijiedarbība ir vājāka nekā pamatstāvoklī un rezultējoša enerģijas starpība starp apakšlīmeņiem ir $D_e = 1.42$ GHz [12], [13]. Istabas temperatūrā un pie ārējā magnētiskā lauka, kas nepārsniedz vairākas Teslas, NV centru elektronu pāri jeb NV centru populācija ir vienlīdzīgi sadalīti pa magnētiskajiem apakšlīmeņiem.

Ierosinot NV centrus ar pietiekami augstas enerģijas lāzera gaismu, piemēram, zaļo gaismu, tiek novērota lāzera inducēta fluorescence (LIF) Relaksējot NV centrs izspīd sarkano gaismu. Pastāv divi relaksācijas ceļi starp ierosināto stāvokli un pamatstāvokli. Primārais relaksācijas ceļš ir 3E tripleta – 3A_2 tripleta pāreja, tā ir spinu saglabājoša pāreja starp ierosinātā stāvokļa un

pamatastāvokļa attiecīgo magnētisko apakšlīmeņu komponentēm. Pārejā starp ierosināto un pamata magnētisko apakšlīmeni $m_s = 0$, kā arī pārejā starp $m_s = \pm 1$, tiek emitēta gaisma ar viļņu garumu 637nm. Otrs, alternatīvais ceļš ir tripleta – singleta – tripleta pāreja. No ierosinātā tripleta 3E notiek bezizstarojuma pāreja uz 1A singleta līmeni. Pārejā no singleta līmeņa 1A uz 1E , tiek izstarots infrasarkanās gaismas kvants ar viļņu garumu 1042 nm, un attiecīgi no 1E singleta notiek bezizstarojuma pāreja uz pamatastāvokļa 3A_2 tripletu. Atšķirībā no primārā relaksācijas ceļa, alternatīvais ceļš nerada fluorescenci redzamajā spektra diapazonā. Pārejas varbūtība no ierosinātā stāvokļa 3E uz singleta līmeni 1A komponentēm $m_s = \pm 1$ ir piecas reizes lielāka par $m_s = 0$, toties pārejas varbūtība no 1E uz pamatastāvokļa 3A_2 apakšlīmeņiem $m_s = \pm 1$ un $m_s = 0$ ir apmēram vienāda. Kā rezultātā var secināt, ka ierosinātie elektronu pāri, kas atrodas magnētiskajos apakšlīmeņos $m_s = \pm 1$, relaksējot emitē salīdzinoši mazāk sarkanās gaismas nekā ierosinātie elektronu pāri, kas atrodas $m_s = 0$. Tādēļ stāvokļi, kad elektronu populācija atrodas $m_s = \pm 1$ apakšlīmenī, tiek saukti par ‘tumšajiem’ stāvokļiem, un, kad populācija ir $m_s = 0$ apakšlīmenī, to dēvē par ‘gaišo’ stāvokli. Veicot vairākus optiskos ciklus, t.i. uzturot pastāvīgu ierosmi, visa NV centra populācija tiek pārnesta uz magnētisko apakšlīmeni $m_s = 0$. Šo fenomenu sauc par optisko polarizēšanu. [14]



Attēls 3.2.1: NV centra līmeņu struktūra [15].

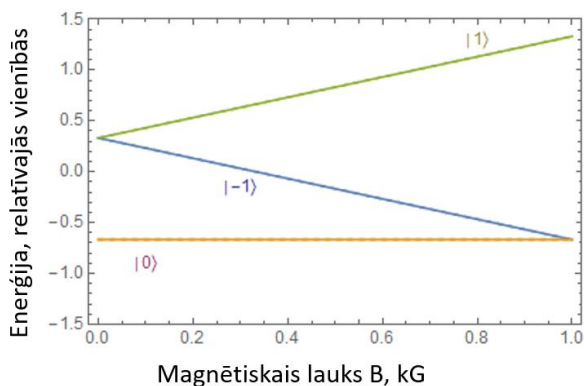
3.3. NV centru manipulācijas ar ārējiem laukiem

Ārējā magnētiskā lauka ietekmē NV centru magnētiskie apakšlīmeņi $m_s = \pm 1$ sašķeļas, un to enerģijas mainās atbilstoši Zēmana efektam.

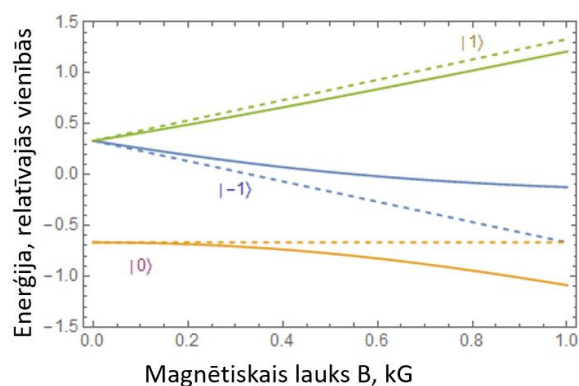
$$\Delta E = \mu_B g_e m_s B_Z, \quad (1)$$

kur m_s – magnētiskais spina kvanta skaitlis, μ_B – elektrona Bora magnetons, g_e – Landē faktors elektronam, B_Z - magnētiskā lauka projekcija uz NV centra asi. [16]. Vienādojums (1) raksturo viena magnētisko apakšlīmeņu enerģētisko nobīdi no deģenerātā pamatstāvokļa ārēja magnētiska lauka ietekmē. Pirmais un otrais loceklis vienādojuma (1) labajā pusē ir elektrona fundamentālās konstantes, tādēļ tos var aizstāt ar vienu locekli - elektrona žiromagnētisko parametru $\gamma_e = g_e \cdot \mu_B$. Tas nosaka enerģijas vērtības izmaiņu uz vienu Gausu, ja enerģija ir izteikta hercos, un tā vērtība ir $\gamma_e = 2.8 \text{ MHz/G}$.

a)



b)



Attēls 3.3.1 : Zēmana efekta reprezentācija NV centru magnētiskajiem apakšlīmeņiem, kad pieliktais ārējais magnētiskais lauks ir: a) paralēls NV centra asij; b) 41° leņķī pret NV centra asi. Raustītās līnijas ilustrē enerģijas izmaiņu, ja magnētiskais lauks ir orientēts gar NV centra asi, savukārt biezas līnijas reprezentē reālo apakšlīmeņu enerģijas izmaiņu, ja magnētiskā lauka virziens nav orientēts gar NV centra asi [17].

Zēmana efekta izraisītā magnētisko apakšlīmeņu sašķelšanās ir raksturojama ar vienādojumu (1), kad leņķis starp NV centra asi un ārējo magnētisko lauku ir vienāds ar nulli. Situācijā, kad pastāv ne-nulle leņķis starp magnētisko lauku un NV centra asi, mazu lauku gadījumā magnētisko apakšlīmeņu enerģijas izmaiņa atkarībā no magnētiskā lauka indukcijas vairs nav raksturojama ar

lineāru atkarību. Citas nobīdes no idealizēta gadījuma izraisa ^{13}C izotopa klātbūtne [18], spraiguma defekti [12], un lokālie elektriskie lauki [19].

Pamatstāvokļa $^3\text{A}_2$ magnētisko apakšlīmeņu enerģijas starpība starp $m_s = 0$ un $m_s = \pm 1$, bez ārēja magnētiska lauka ietekmes, ir $D_g = 2.87\text{GHz}$. Ierosinot NV centrus ar pastāvīgu mikroviļņu (MW) starojumu, kura frekvence atbilst enerģijas starpībai D_g , apdzīvotība, kas atrodas apakšlīmenī $m_s = 0$ absorbē šo enerģiju un pāriet uz magnētisko apakšlīmeni $m_s = \pm 1$. MW izmanto, lai nodrošinātu apdzīvotību apakšlīmeņos $m_s = \pm 1$, kad NV centrs tiek optiski polarizēts. Gadījumā, kad ārējais magnētiskais lauks ir pielikts, enerģijas starpība starp magnētiskajiem apakšlīmeņiem vēl joprojām ir mikroviļņu diapazonā. Ja pieliktais magnētiskais lauks ir virs 100 kG (10 Teslas), tad enerģijas starpība starp magnētiskajiem apakšlīmeņiem ir infrasarkanajā diapazonā.

No (1) vienādojuma var saprast, ka pie pietiekami liela magnētiskā lauka, pamatstāvokļa magnētiskā apakšlīmeņa $m_s = -1$ enerģija būs vienāda vai zemāka par $m_s = 0$ enerģiju. Šo līmeņu krustošanās notiek pie 1024 Gausu stipra ārējā magnētiskā lauka, šo enerģijas krustpunktu sauc par pamatstāvokļa līmeņu antikrustošanos (*ground state level anti crossing* - GSLAC). [20] Apakšlīmeņu krustošanās dēļ tiek zaudēts fluorescences kontrasts. [21], [22]. Līdzīga magnētisko apakšlīmeņu krustošanās starp $m_s = 0$ un $m_s = -1$ notiek arī ierosinātajā stāvoklī, bet vājākas dipola – dipola mijiedarbības dēļ, apakšlīmeņu krustošanās notiek jau pie 500 Gausu stipra magnētiskā lauka, un to sauc par ierosinātā stāvokļa līmeņu antikrustošanos (*excited state level anti crossing* - ESLAC) [23].

Pamatstāvokļa dipola – dipola mijiedarbība D_g ir atkarīga no dimanta kristālrežģa izmēriem. Temperatūras ietekmē kristāliskais režģis izplešas, kas samazina dipola – dipola mijiedarbību, kā rezultātā samazinās enerģijas starpība starp magnētisko apakšlīmeni $m_s = 0$ un apakšlīmeņiem $m_s = \pm 1$. Šī ietekme ir lineāra $dD/dT = -72.2\text{ kHz/K}$ 297 – 333 Kelvinu robežās [24].

3.4. Optiski detektējamās magnētiskās rezonances

ODMR līdzīga metode, kas tika izmantota magnetometrijā ir elektronu paramagnētiskā rezonanse (EPR), citreiz dēvēta arī par elektronu spinu rezonansi (ESR). Metodika balstījās uz mikroviļņu absorbciju. Pie fiksētas mikroviļņu frekvences, izmantojot paramagnētiskus centrus,

piemēram, brīvos radikāļus – molekulas ar nesapārotiem elektroniem, tiek meklēta magnētiskā lauka indukcija, pie kuras ir iespējams novērot mikroviļņu absorbciju. Pētāmajam paraugam ir jānodrošina ļoti zema temperatūra, pāris desmitu Kelvinu, lai elektronu apdzīvotība būtu zemākajos apakšlīmeņos. Turklāt mikroviļņu absorbcijas reģistrēšana ir sarežģīts process.

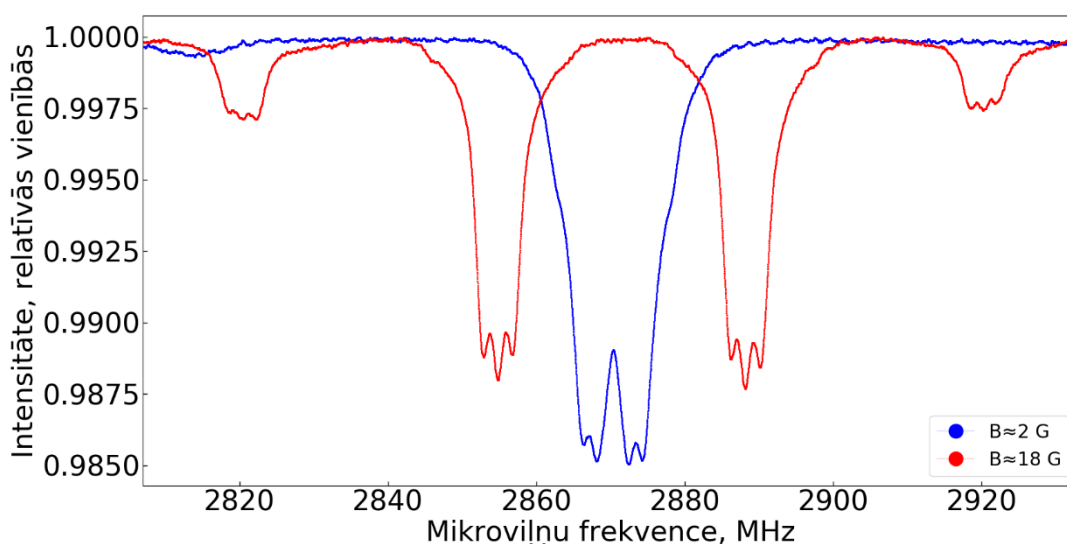
ODMR metodes pamatā ir NV centru LIF intensitātes atkarība no pievadīto mikroviļņu frekvences. Bez ārējā magnētiskā lauka, uzņemot ODMR spektru vienam NV centram, tiek novērots viens fluorescējošās gaismas minimums (pīķis) pie frekvences 2.87 GHz, kas ir enerģijas starpībai starp NV centra magnētiskajiem apakšlīmeņiem $m_s = 0$ un $m_s = \pm 1$ deģenerātā stāvoklī, un šo frekvenci dēvē par nulles lauka magnētiskā rezonanses frekvenci.

Magnetometrijas pētījumos, tiek izmantotas vairākas metodes un konfigurācijas ar NV centriem. Viena no tām ir uzņemt pētāmā parauga magnētiskā lauka ietekmi uz visām četrām NV centru asīm. Šīs metodes ODMR spektrā redzams, ka pa pāriem simetriskā attālumā (enerģijā) pret nulles lauka rezonansi izvietojas astoņi pīķi - rezonanses frekvences, kas pa pāriem atbilst katra NV centra virziena magnētisko apakšlīmeņu $m_s = -1$ un $m_s = +1$ enerģijām. Šāda konfigurācija ļauj iegūt gan amplitūdas, gan vērsuma informāciju par magnētisko lauku [25]. Tomēr šī metode nav efektīva, ja ODMR spektrs jāuzņem plašā MW diapazonā, piemēram, kad pētāmais paraugs rada spēcīgu magnētisko lauku, vai tiek pētīti paramagnētiski materiāli, kam nepieciešams pielikt spēcīgu ārējo lauku.

Kad būtiska ir tikai magnētiskā lauka amplitūdas informācija, tiek izmantota metode, kurā magnētiskā lauka virziens ir orientēts gar vienu no četrām NV centru asīm, šāda metodika nodrošina orientētajam NV centram vislabāko jūtību, t.i. lielāks enerģijas pieaugums magnētiskajiem apakšlīmeņiem uz Gausu. Ja magnētiskais lauks ir precīzi orientēts gar kādu no NV centru asīm, tad magnētiskā lauka projekcija uz pārējām asīm ir vienāda, un to magnētisko apakšlīmeņu enerģijas arī ir vienāds. Tā rezultātā ODMR spektrā novēro četrus minimumus (pīķus). Attēlā 3.4.1 ir redzams šīs metodes ODMR spektrs. Iekšējie pīķi, tuvākie nulles lauka rezonanses frekvencei, atbilst trīs deģenerēto NV virzienu magnētisko apakšlīmeņu $m_s = \pm 1$ enerģijām, ārējie pīķi atbilst orientēto NV centru komponentēm. Jāpiemin, ka precīzos ODMR ainās mērījumos ir iespējams novērot kodola ^{14}N supersīkstruktūras komponentes katrā rezonanses pīķī.

Pie magnētiskajiem laukiem, kas zemāki par 100 G, kad ārējais lauks ir orientēts gar vienu NV centra asi, var novērot, ka iekšējo pīķu kontrasta amplitūdas ir trīs reizes lielākas par ārējo pīķu

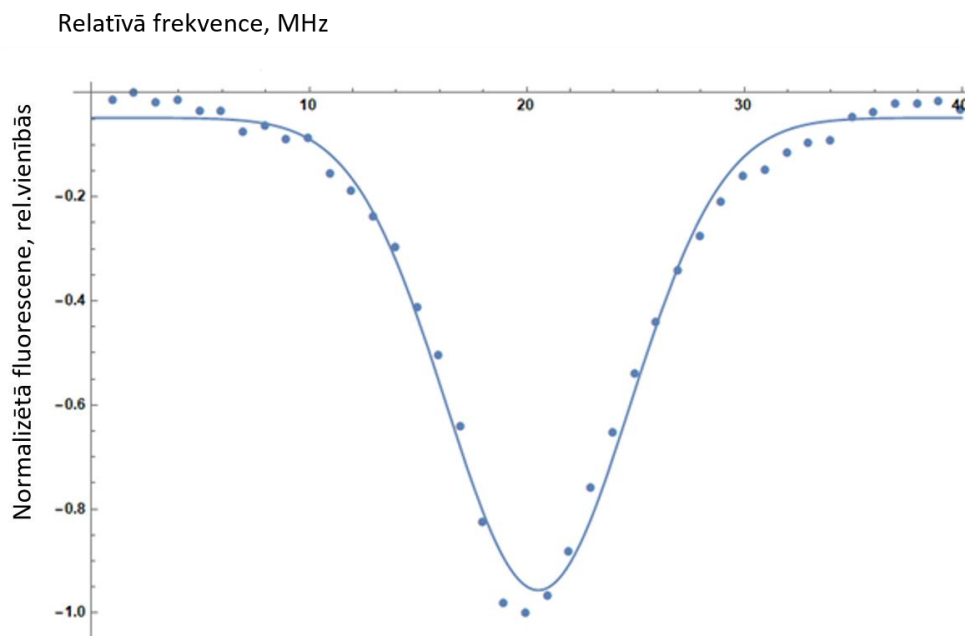
amplitūdām, jo kopējo bezizstarojuma pāreju skaitu deģenerētajā stāvoklī veido trīs NV centru virzieni. Deģenerēto virzienu pīķa platums, pozīcija, simetriskums sniedz informāciju par to, cik labi orientēts ir iestatītais magnētiskais lauks pret nedeģenerēto NV centra asi. Proti, kad tiek orientēts ārējais magnētiskais lauks pret kādu no NV centra asīm, vadoties pēc ODMR signālā, tiek meklēta magnēta pozīcija, kurā pārējo trīs NV centra virzienu raksturojošie pīķi pārklājas vienā, un tie vairs nav atsevišķi atšķirami, kļūstot par deģenerētu stāvokli. Orientētā NV centra ass tiek izmantota kā galvenā kvantēšanas ass magnētisko lauku pētīšanā. Lai pietiekami precīzi raksturotu pētāmā magnētiskā lauka amplitūdu un struktūru, no ODMR ainas jānoskaidro tikai viena magnētiskā apakšlīmeņa $m_s = -1$ vai $m_s = +1$ rezonanses frekvences orientētajam NV centram. Uzņemtās ODMR ainas diapazons ir atkarīgs no pētāmā magnētiskā lauka stipruma, pārsvarā tie ir pāris desmiti MHz.



Attēls 3.4.1 : Eksperimentāli iegūta ODMR aina, kad ārējais magnētiskais lauks ir orientēts gar vienu NV centra asi. Zilā līnija atbilst ODMR aintai, kad ir pielikts 2 G stiprs magnētiskais lauks, redzami tikai 2 pīķi, jo pieliktais lauks ir tuvs nulles laukam. Sarkanā līnija – ODMR aina pie 18 G magnētiskā lauka, novērojami četri pīķi: iekšējais pāris, tuvākie nulles lauka rezonanses frekvencei atbilst trīs deģenerēto NV centru virzieniem; ārējais pīķu pāris atbilst orientētā NV centra virziena magnētisko apakšlīmeņu rezonansēm. Katra rezonanse šķēļas 3 supersīkstruktūras apakšlīmeņos izotopa ^{14}N kodola spina $I = 1$ dēļ [12].

Eksperimentāli iegūtās ODMR ainas pīķis tiek aprakstīta ar Gausa funkciju (attēls 3.4.2). Tas samazina trokšņu radīto kļūdu, un ir iespējams precīzāk iegūtu pīķa centru jeb minimālo vērtību,

un tā tiek noteikta rezonanses frekvences vērtība. Iegūstot rezonanses frekvences NV centra magnētiskajiem apakšlīmeņiem $m_s = \pm 1$, pēc vienādojuma (1) var aprēķināt, cik ir liela pieliktā magnētiskā lauka projekcija uz NV centra asi.



Attēls 3.4.2 : Eksperimentāli iegūtā ODMR aina kameras vienā pikselī pēc vairākiem veiktiem cikliem. Datu kopai piedzen Gausa funkciju, kas arī nosaka rezonanses frekvences vērtību.

Magnētisku materiālu izpētē, tiek pētīts magnētiskais signāls, kas veidojas magnētiskā materiāla mijiedarbībā ar ārējo magnētisko lauku.

Feromagnētiskie materiāli veido magnētisku domēnus, struktūras, kam ir ne-nulles magnētiskais moments. Kopējais domēnu radītais magnētiskais lauks materiālā ir tuvs nullei. Ārējā magnētiskā laukā feromagnētiķa domēni tiek polarizēti ārējā lauka virzienā. Noņemot ārējo lauku, domēni nemaina magnētiskā momenta orientāciju telpā, šo īpašību sauc par magnetizāciju.

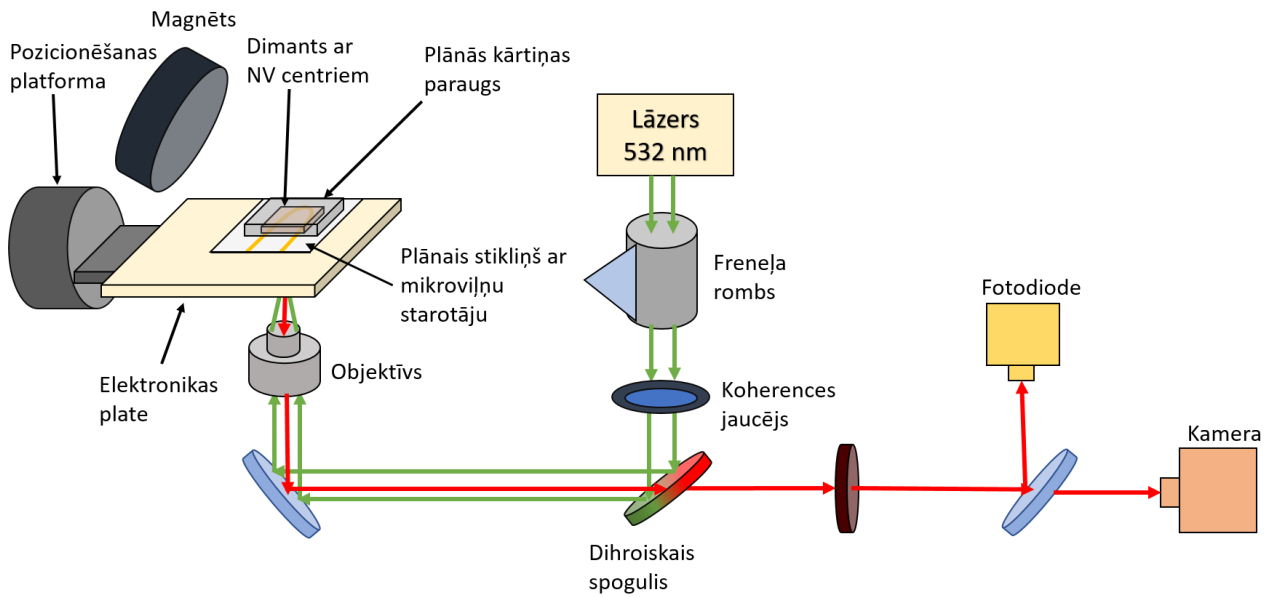
Antiferomagnētiskos elementos magnētiskās struktūras cenšas orientēties tā, lai kompensētu blakus esošos momentus, tādējādi veidojot regulāras struktūras, kur blakus esošie magnētiskie momenti vērsti pretējos virzienos. Lai arī ideālā gadījumā antiferomagnētiskiem materiāliem vajadzētu būt nemagnētiskiem, realitātē nelielas novirzes no ideālas spinu orientācijas noved pie feromagnētiķiem līdzīgas īpašības – pastāvīgas magnetizācijas.

Paramagnētiski elementi neveido magnētiskus domēnus, bet ārēja lauka ietekmē inducē magnētisko lauku, kā virziens orientējas ārējā lauka virzienā. Ja materiāls ārēja lauka ietekmē inducē magnētisko lauku, kas orientējas pretēji pieliktajam laukam to sauc par diamagnētiķi.

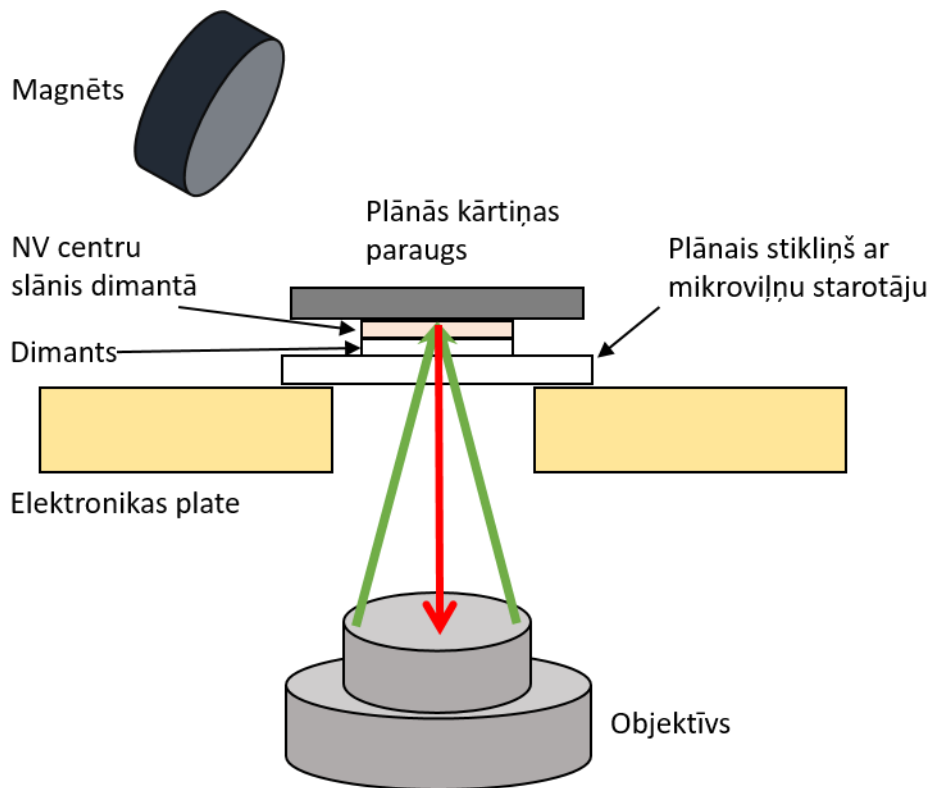
4. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

4.1. Eksperimentālā iekārta

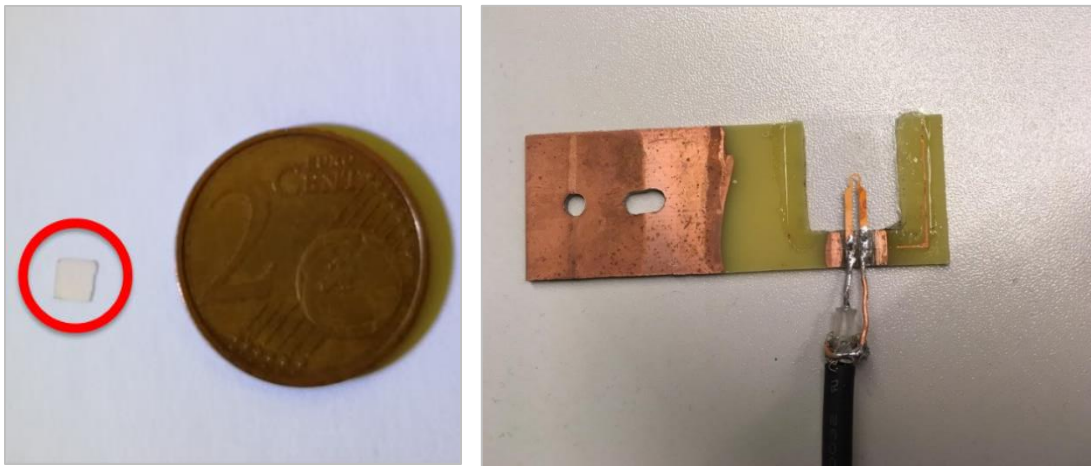
Magnētisko plāno kārtiņu pētīšanas shēma, kas atainota attēlā 4.1, sastāv no ierosinošās gaismas avota, COHERENT Verdi -V18 $\lambda = 532$ nm lāzers. Gaisma tiek nogādāta uz dimantu caur optisko sistēmu, kuras sastāvā ir Freneļa rombs THORLABS FR600HM, kas strādā kā $\lambda/2$ plāksnīte. Savienojamā ar rotējošo stiprinājumu, tas tiek izmantots, lai pagrieztu lāzera gaismas elektriskā lauka svārstību plakni ortogonāli pret mērījumam izvēlēto NV centra asi. Lāzera stars pēc tam iziet cauri koherences jaucējam Optotune LSR-3005-6D-VIS. Tas sastāv no diviem plāniem matstikliem, un viens no tiem tiek svārstīts, kas arī nodrošina fāžu atšķirību gaismas stariem. Starp Freneļa rombu un koherences jaucēju atrodas statīvs baltās gaismas optiskajam kabelim. Kā avotu baltajai gaisma izmanto Edmund Optics MI – 150, kuru izmanto, lai iegūtu plāno kārtiņu optiskos attēlus un tos varētu salīdzināt ar magnētiskajiem attēliem. Pēc tam, kad gaismas kūlis ir izgājis cauri koherences jaucējam, tas tiek fokusēts uz NV centru slāni dimantā ar objektīva OLYMPUS Plan N 40x palīdzību, apgaismojot $30 \times 30 \mu m$ lielu apgabalu. Gaismas kūļa fokusēšanas procesu dažādos dziļumos nodrošina objektīva turētājs, kas ir motorizēts izmantojot vertikālās translācijas platformu Standa 8MVT40-13 ar kustības soli $0.083 \mu m$. Fluorescējošā sarkanā gaisma tiek savākta ar šo pašu objektīvu, un tiek atdalīta no zaļās gaismas ar dihroisko spoguļi THORLABS DMLP567R, tas atstaro gaismu ar viļņu garumu zem 567 nm, un attiecīgi laiž cauri gaismu ar viļņu garumu virs 567 nm. Papildus tam, gaismas kūlis, kas netiek atstarots ar dihroisko spoguļi, tiek filtrēts ar sarkanās gaismas filtru. Gaisma, kas tiek cauri filtram, tiek raidīta uz Andor NEO-5.5-CL3 sCMOS kameru vai THORLABS PDA36A-EC fotodiodi.



Attēls 4.1.1 : Eksperimentālās iekārtas shēma.



Attēls 4.1.2 : Plānās kārtiņas mērījuma shēma.



Attēls 4.1.3: Attēlā kreisajā pusē redzams eksperimentā izmantotais, NV centru saturošais, dimants, ko uzlīmē uz (attēla kreisajā pusē redzamā) autora taisītā parauga turētāja.

NV centru saturošais dimants, kas ir redzams attēlā 4.1.2, ir pielīmēts ar Crystalbond 509 līmi uz plāna stikliņa, uz kura atrodas vara celiņš, kas tiek izmantots kā mikroviļņu starotājs. Vara celiņam vajag pielodēt klāt mikroviļņu vadu, bet to nevar tiešā veidā darīt uz plānā stikliņa, tā trausluma dēļ. Tādēļ plānais stikliņš ir piestiprināts ar jau iepriekš izmantoto līmi uz elektronikas plates. Elektronikas plate ir nokodināta ar vara sulfāta šķīdinātāju, atstājot tikai vajadzīgo vara celiņu, pie kura tiek pielodēts mikroviļņu vads, kā arī ar lodalvu tiek izveidota pāreja starp elektronikas plates un plānā stikliņa vara celiņiem. Tiek izmantots Stanford Research Systems SG384 mikroviļņu ģenerators un MW pastiprinātājs Mini-Circuits ZHL-16W-43-S+. Izmantojot elektronikas plati, to ir viegli piestiprināt pozicionēšanas platformai, kas kustas pa X Y plakni. Pozicionēšanas platformu veido divi perpendikulāri vērsti motorizētās translācijas platformas Standa 8MT173 ar soli 1.25 μm , tas ļauj veikt mērījumus dažādos dimanta apgabalos. Attālinoties no MW starotāja relatīvi strauji samazinās MW jauda. Šis ierobežojums neļauj veikt mērījumus patvaļīgā dimanta apgabalā, nemainot paša dimanta pozīciju uz plānā stikliņa.

4.2. Eksperimentālās metodikas

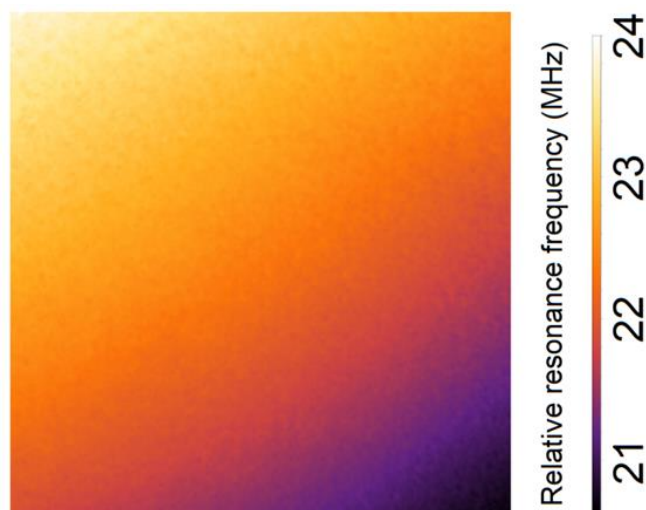
Šajā darbā tiek izmantota konfigurācija, kad ārējais magnētiskais lauks ir orientēts gar vienu no NV centru asīm (raksturota nodaļā 3.4). Magnētiskā lauka avots ir pastāvīgs magnēts. Pirms

tiek sākta plāno kārtiņu magnētisko īpašību pētīšana, tiek uzņemta ODMR aina ārējam magnētiskajam laukam, iegūstot magnētiskā lauka gradientu, kas redzams attēlā 4.2.1 (a). Magnētiskā lauka attēla iegūšana ir vairāku pakāpju rezultāts.

Vispirms LIF tiek novadīta uz fotodiodi. Fluorescences intensitāte tiek atainota osciloskopā, pie kā arī ir pieslēgts mikroviļņu ģenerators profils. Šajā procesā MW ģenerators ir ieslēgts modulācijas režīmā, kas paredzēts fotodiodes mērīšanas režīmam. Šajā mērīšanas režīmā tiek noteikta izvēlētā NV centra virziena magnētisko apakšlīmeņu $m_s = \pm 1$ aptuvenās rezonances frekvences pie esošā ārējā magnētiskā lauka. Šīs divas iegūtās (attiecīgi $m_s = -1$ komponente un $m_s = +1$) rezonansu frekvenču vērtības atbilst vidējai vērtībai, kas iegūta no visa apgaismotā reģiona jeb visiem ierosinātajiem nedeģenerētajiem NV centriem. Tipiski eksperimentā $m_s = +1$ magnētiskās rezonances frekvence ir diapazonā $\sim 3000 - 3450$ MHz, kas atbilst $B \approx 50 - 200$ G.

Kad ir noskaidrotas aptuvenās magnētiskās rezonances frekvences, mērīšanas režīms tiek pārslēgts uz telpiska fluorescences sadalījuma mērīšanu. Šajā procesā MW ģenerators tiek pārslēgts uz modulācijas režīmu, kas ģenerē nepārtrauktu frekvenču skanu. Darbības (skenēšanas) reģions ir 40 MHz, kur centrālā frekvence ir iepriekš noteiktā aptuvenā rezonances frekvence orientētā NV centra magnētiskajam apakšlīmeni $m_s = -1$ vai $m_s = +1$. Šāda pieeja ļauj raksturot magnētiskā lauka relatīvo indukciju tieši pētāma dimanta apgabalā. Jāpiemin, ka gan iestatītā magnēta, gan plāno kārtiņu magnētiskā lauka mērījumos, mēs mēram tikai magnētisko rezonansu frekvenču nobīdi vienā apakšlīmenī, izvēloties apakšlīmeni ar labāko kontrastu ODMR ainā. Iegūtie dati sniedz pietiekami precīzu informāciju, tādēļ netiek mērīta rezonansu nobīde abos magnētiskajos apakšlīmeņos, jo tas paildzina mērījumu laiku. Programmatūrā LabVIEW ir izveidota programma, kurā tiek sasaistīta sCMOS kameras attēla uzņemšanas laiks ar MW ģenerators frekvences pārslēgšanas ātrumu. Izmantotās kameras mazākais nepieciešamais ekspozīcijas laiks attēla (kadra) uzņemšanai ir 20 ms. Kadra uzņemšanas laikā, MW ģenerators izskenē cauri šauram frekvenču diapazonam. Kā rezultātā viena attēlā uzņemšanas laikā, netiek uzturēta diskrēta frekvence, bet gan šaurs nepārtraukts frekvenču apgabals. Viena mērījuma laikā tiek iegūts 40 LIF intensitāšu attēli pie 40 atšķirīgiem šauriem frekvenču diapazoniem, t.i., ja MW ģenerators ir iestatīts 40 MHz diapazonā, tad viens solis ir 1 MHz. LIF, kas nāk no apgaismotā $30 \times 30 \mu\text{m}$ dimanta apgabala, tiek reģistrēta uz sCMOS matricas, kuras izšķirtspēja ir 512×512 pikseli. Katrā pikselī tiek reģistrēta LIF atkarībā no pievadīto MW frekvences. Viens mērījumu cikls nav pietiekams, lai iegūtu pietiekami kvalitatīvu datus, lai ar tiem varētu attēlot magnēta magnētisko

lauku, tādēļ tiek veikti vismaz 100 šādi cikli, kas atbilst aptuveni 17 – 23 minūtēm, bet var ielgt līdz pat 30 min, ja LIF intensitāte ir zema. Plāno kārtiņu mērījumos tie pat var būt virs 1000 cikliem. Kā rezultātā LIF intensitātes mērījumi pie šaurajām frekvenču vērtībām ir vairāku mērījumu vidējā vērtība. Iegūtā ODMR aina kameras katrā pikselī tiek piedzīta ar funkciju $A_0 - F(\nu, \nu_0, C, \Delta\nu)$, kur A_0 – fona signāla līmenis, F – Gausa funkcija, ν – mikroviļņu frekvence, ν_0 – magnētiskās rezonanses frekvence, C – intensitātes kontrasts un $\Delta\nu$ – pīķa pusplatums (attēls 3.4.2). Aproximācijas rezultātā tiek noteikta pīķa centra frekvence, kas tiek pieņemta par relatīvo magnētisko rezonanses frekvenci konkrētajā kameras pikselī. Jauniegūtās matricas, ko veido iegūtās relatīvās magnētiskās rezonanses frekvences katrā pikselī, vērtībām tiek piemērota krāsu skala. Tādējādi iegūst vizualizētu magnētiskā lauka attēlu, rezonanšu frekvenču vienībās, un, zinot žiromagnētiskā parametra vērtību, kas ir 2.8 MHz/G, ir viegli pāriet uz relatīvo magnētiskā lauka indukciju.



Attēls 4.2.1 : Magnētiskā lauka attēls iestatītajam magnētam. Magnētiskais signāls ir homogēns, un magnēts veido 0.026 G/ μ m stipru magnētiskā lauka gradientu apgaismotajā reģionā.

Magnēta iegūtais magnētiskā lauka attēls var tikt uzskatīts kā fona mērījums, kad tiek pētītas plānās kārtiņas. Uzņemot plāno kārtiņu magnētiskos attēlos, tiem var noņemt magnēta radīto gradientu, ja ir zināma attēla raksturojošā Gausa funkcija. To var iegūt apstrādājot attēlu ar Gausa izlīdzināšanu. Lai izmantotu šo vienu fona attēlu visiem plāno kārtiņu mērījumiem, nedrīkst mainīt ne magnēta pozīciju, ne apgaismojuma atrašanās vietu pret magnētu.

Plāno kārtiņu magnētiskā lauka attēla iegūšanas process ir teju tāds pats kā magnēta magnētiskā lauka attēlošanas process. Papildus darbība, kas nāk klāt, ir plānās kārtiņas optiskā attēla uzņemšana pirms magnētiskā lauka pētīšanas.

4.3. Eksperimentā izmantotais dimants ar NV centriem

Eksperimentā izmantotais dimants ir augstas temperatūras, augsta spiediena (*high pressure, high temperature* - HPHT) tipa dimants. Šī izgatavošanas metodika mēģina atdarināt dimantu rašanos dabā. Laboratorijas apstākļos, audzēšanas kamerā tiek iegūta temperatūra robežās 1600 – 1800 K un nodrošināts augsts spiediens 5 – 6 GPa. Vakuumkamerā nodrošina temperatūras gradientu, kur karstākajā vietā atrodas oglekļa avots (grafīts vai dimanta putekļi) un vēsākajā vietā atrodas dimanta graudi. Oglekļa avots izšķīst un difūzijas ceļā kristalizējas uz dimanta grauda. Audzēšanas procesā tiek pievienoti ^{14}N atomi. [26] Pēc tam izaudzētais dimants ar ^{14}N piejaukumu tiek apstarots ar augstas enerģijas paātrinātiem elektroniem. Dimanta režģī esošie atomi, galvenokārt, oglekļa atomi tiek izsisti ar elektronu palīdzību, radot režģa vakances defektus. Elektronu enerģija nosaka iespējamās dziļumu, jeb ir zināms, cik dziļā slāni tiks iegūtas režģa vakances pēc paātrināto elektronu enerģijas.

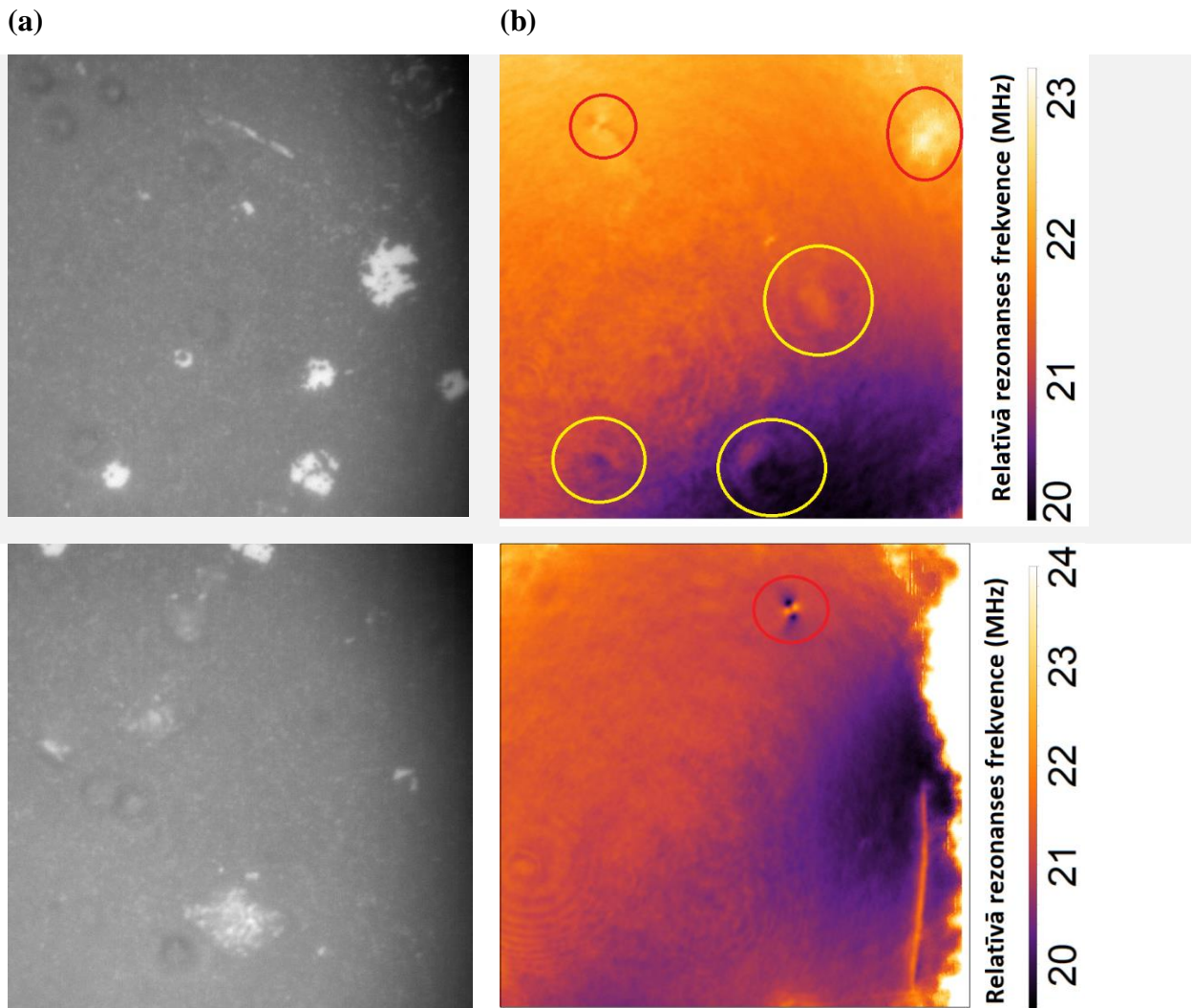
5. REZULTĀTI

Darba izstrādes laikā tika pētītas dažādu tipu magnētiskas plānās kārtiņas, tādēļ iegūtie rezultāti tiek grupēti pēc attiecīgo plāno kārtiņu tipa.

Pirmā pētītā plānā kārtiņa ir izveidota sekojošā veidā: uz MgO pamatnes pie aptuveni 900 K no trīs dažādu mērķu kombinācijas, ko veido hroms - antiferomagnētiķis, mangāns - paramagnētiķis, gallijs - dimagnētiķis un ogleklis – paramagnētiķis, uzputina ~600 nm biezu kārtiņu. Korekta plānās kārtiņas formula būtu $(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{GaC}$. Pēc tam šai kārtiņai papildus pa virsu tiek uzputināts ~60 nm molibdēna joslas. Turpmāk tekstā uz šo kārtiņu atsauksos kā paraugs nr. 1.

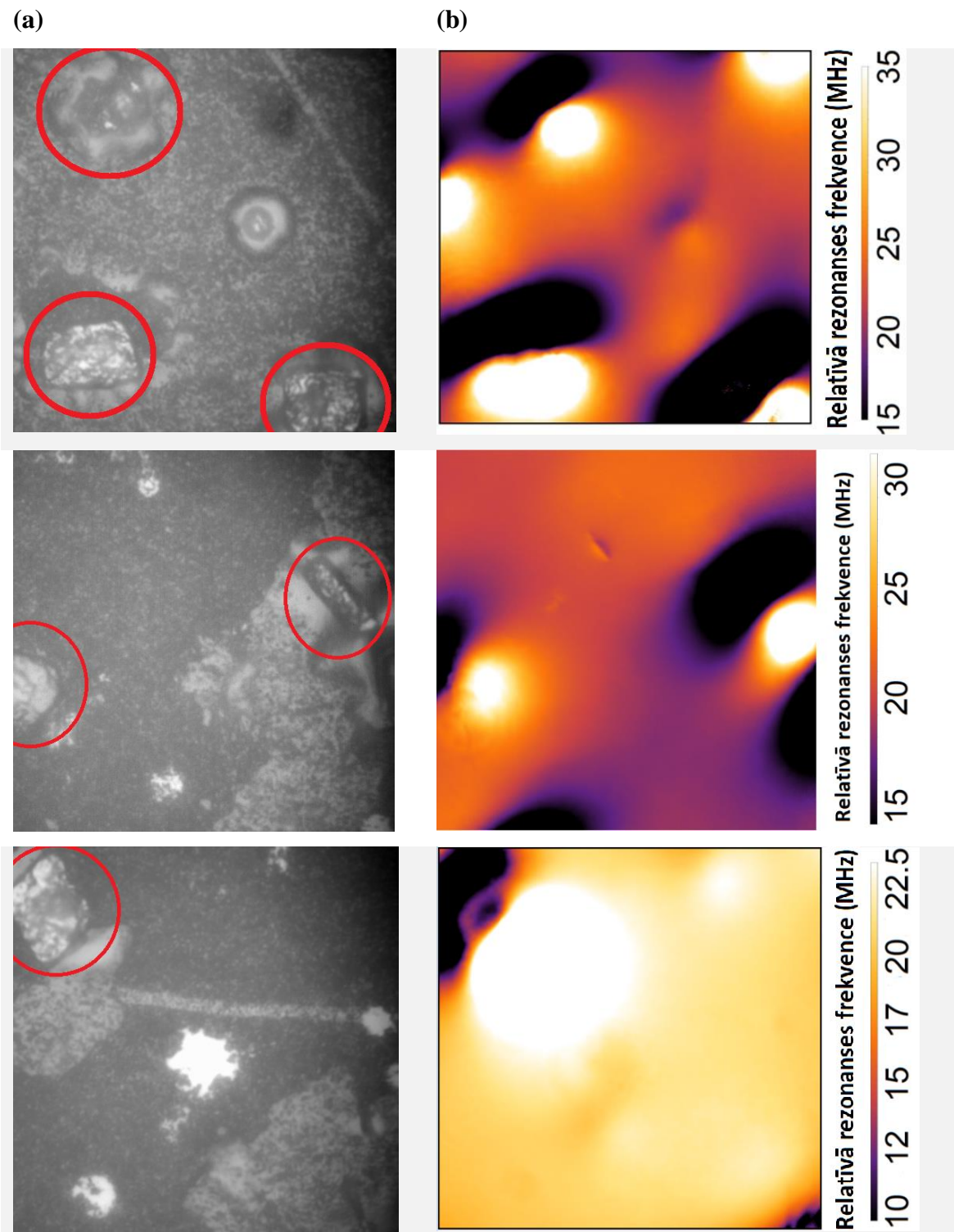
Izmantotie ķīmiskie elementi plānajās kārtiņās ir ar dažādām magnētiskajām īpašībām, kas dod gan relatīvi spēcīgas, gan relatīvi vājas magnētiskā lauka struktūras (plašāk raksturotas nodaļā 3.4).

Pirms tiek uzsākta plānās kārtiņas magnētiskā lauka izpēte, tiek veikta optiskā analīze. Skatoties ar neapbruņotu aci, 1. parauga virsmu varētu raksturot kā matētu augšējo slāni un ar izteiktām sešām gaišām līnijām dziļākā slāni. Turpmāk tekstā atsauksos uz apgabaliem, kur nav šīs gaišās līnijas, kā tumšajiem reģioniem (molibdēna joslas). Gaišās līnijas un tumšos reģionus veido dažādas izmantoto materiālu kombinācijas. Uzņemot optiskos attēlus tumšajos reģionos, ir novērojami balti plankumi uz virsmas, tās ir gallija struktūras. Šīs struktūras, kas redzamas optiskajos attēlos (attēli 5.1 (a)), dod ļoti vāju magnētisko signālu, un, iespējams, rada papildus interferenci gaisa slānītī starp paraugu un dimantu, veidojot magnētiskā signāla anomālijas (atzīmēts ar dzeltenu). Savukārt, magnētiskajos attēlos (attēli 5.1 (b)) ir redzami magnētiski signāli (atzīmēti ar sarkanu), kuriem nav novērojumu struktūru optiskajos attēlos. Šie signāli visticamāk nāk no dimanta kristāla virsmas defektiem. Pēc sistēmas uzlabošanas ar koherences jaucēju, tika novērots, ka gallija plankumi tiešām veido ļoti vāju magnētisko signālu (attēls 5.2). Optiski tika arī detektētas graudveidīgas struktūras, kas vairāk absorbē balto gaismu, proti, mazāk atstaro gaismu salīdzinoši ar primāri detektējamām baltajām struktūrām.



Attēls 5.1 : Parauga nr. 1 mērījumi dažādos tumšo reģionu apgabalos. Kolonā (a) optiskie attēli un kolonā (b) magnētiskā lauka attēli. Otrās rindas magnētiskajā attēlā redzama izteikta magnētiskā signāla anomālija. Nevienmērīga apgaismojuma dēļ iegūta trokšņaina ODMR ainu, un rezonanses frekvenci iegūst no lielākā trokšņa.

Veicot optisko analīzi gaišo līniju apgabalos (attēls 5.2 (a)), novērojama daudz lielāka klātbūtne ar šīm mazāk gaismu atstarojošajām graudveidīgajām struktūrām, kā arī to izmēri ir salīdzinoši lielāki (atzīmēts ar sarkanu). Šīs struktūras ir visticamāk intermetāliskie savienojumi Mn_5Ga_8 vai Cr_5Ga_8 . Magnētisko lauku attēlos ir novērojama salīdzinoši lieli un aptuveni 3 – 5 G spēcīgi magnētiskie lauki vietās, kur atrodas šīs graudveidīgās struktūras.

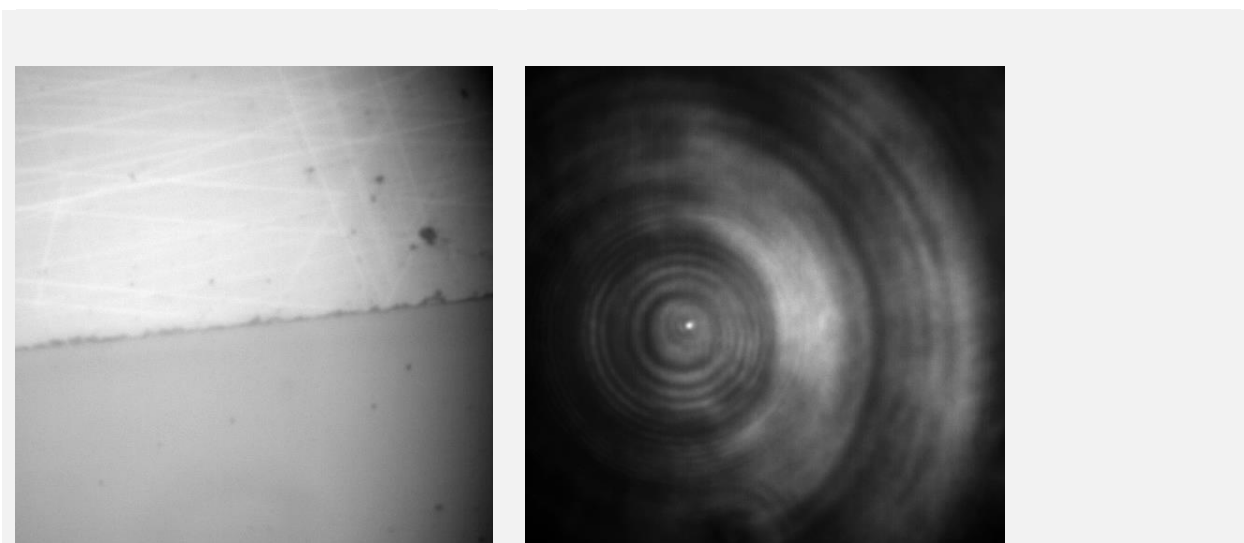


Attēls 5.2 : Pirmā parauga mērījumi dažādos gaišo līniju apgabalos. Kolonnā (a) optiskie attēli un kolonnā (b) magnētiskā lauka attēli. Pirmās rindas attēlos novērojams defekts, kas izraisa vāju magnētisko signālu, bet tas vizuāli nelīdzinās citiem iepriekš novērotajiem defektiem. Trešajā rindā redzams baltais gallija plankums, magnētiskajā attēlā nav novērojamas interferences, bet ir detektējami vāji magnētiski signāli vietās, kur atrodas šis plankums.

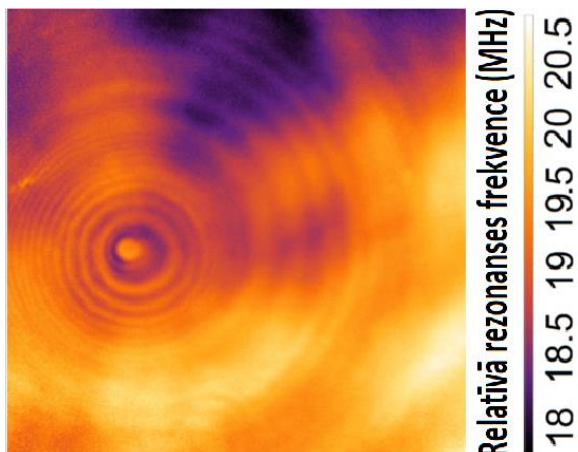
Nākamais pētāmais plāno kārtiņu tips – paraugs nr. 2 ir līdzīgs paraugam nr. 1. Plānā kārtiņa nr. 2 ir veidota optimālākos audzēšanas apstākļos. Atšķirībā no parauga nr. 1, šīs kārtiņas virsma ir spīdīga, ne matēta. Tā pat kā pirmajai kārtiņai, šīs kārtiņas dziļākā slāni ir novērojamas 6 gaišas līnijas. Veicot optisko analīzi dažādos gaišo līniju reģionos, novērojamas mazas, tumšas punktveida struktūras un daudzas gaišas švīkas, kas, iespējams, ir mehāniski radīti defekti. Tumšajos reģionos arī ir redzami šie mazie, tumšie punkti. Uz parauga nr. 2 virsmas nav novērojamas graudveidīgās struktūras, kuras bieži novēro uz parauga nr. 1 virsmas. Magnētiskā lauka mērīšanas laikā, tika novērots, ka caur dimantu izgājušī zaļā lāzera gaisma atstarojas pret plānās kārtiņas spīdīgo virsmu un veido interferences joslas uz NV centru slāni dimantā (attēls 5.3 (b)). Optiskā šo parādību sauc par etalona efektu (*etaloning effect*), var uzskatīt, ka starp dimantu un plāno kārtiņu izveidojas Fabri – Pero etalons. Interferences ainu maksimumos dimanta temperatūra paaugstinājās, lokālie temperatūras gradienti izraisa šajos reģionos enerģijas izmaiņu starp magnētiskajiem apakšlīmeņiem. Iegūtās ODMR ainu interferences maksimumos ir trokšņainas un pīķu formas mainās. Abi šie interferences ainu izraisīti defekti ‘iespiežas’ magnētisko lauku mērījumos un iegūtajos rezultātos (attēls 5.3 (c)).

(a)

(b)



(c)

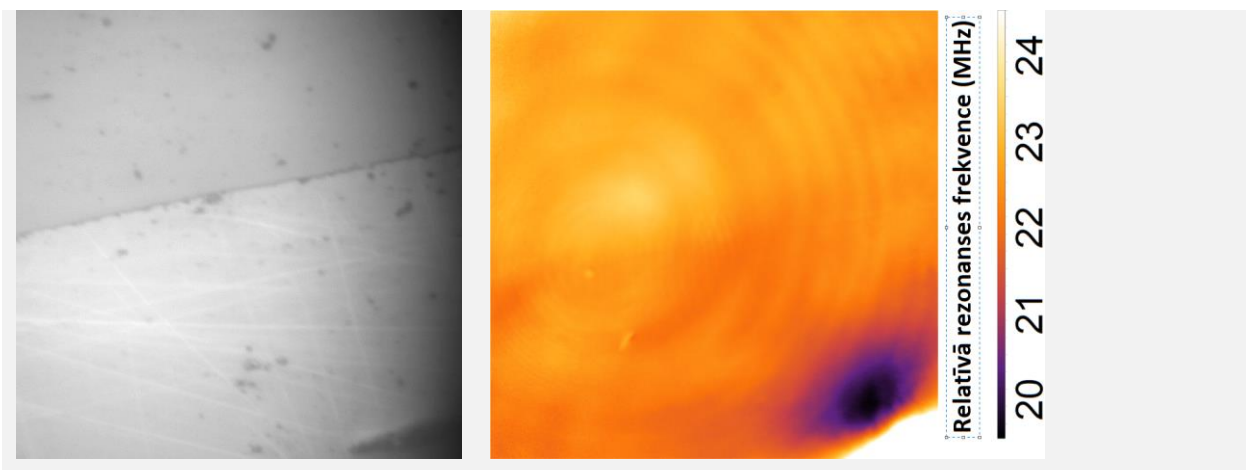


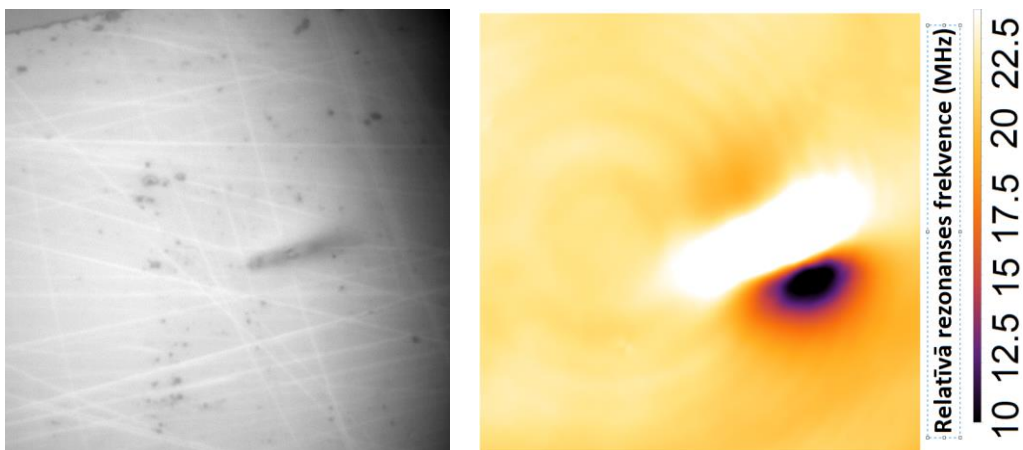
Attēls 5.3: Parauga nr. 2 izpēte : (a) optiskais attēls,; (b) optiskais attēls ar dimanta virsmu, uz kuras veidojas interferences joslas; (c) iegūtais magnētiskais attēls. Dimanta optiskais attēls uzņemts, kad uz tā spīdina zaļo gaismu.

Pirmā risinājuma metode bija mērīt magnētiskās rezonanses abiem apakšlīmeņiem $m_s = \pm 1$, teorētiski šai darbībai vajadzētu noņemt temperatūras radīto rezonansu nobīdi. Iegūtie rezultāti (attēls 5.4) ar šo metodi ir sniedz uzlabojumu, bet pavisam nenoņem interferences radītos magnētiskā signāla defektus. Šī metode ir sarežģītāka un laiktīlīgāka, jo MW ģeneratoram jāpārslēdzas starp diviem skenēšanas diapazoniem, viens diapazons, kurā atrodas magnētiskais apakšlīmenis $m_s = +1$, un attiecīgi otrs diapazons $m_s = -1$ frekvences atrašanai. Pārslēgšanās jāveic pēc katra veiktā skenēšanas cikla, tādējādi rezultātos tiek ietverti visi īstermiņa notiekošie procesi.

(a)

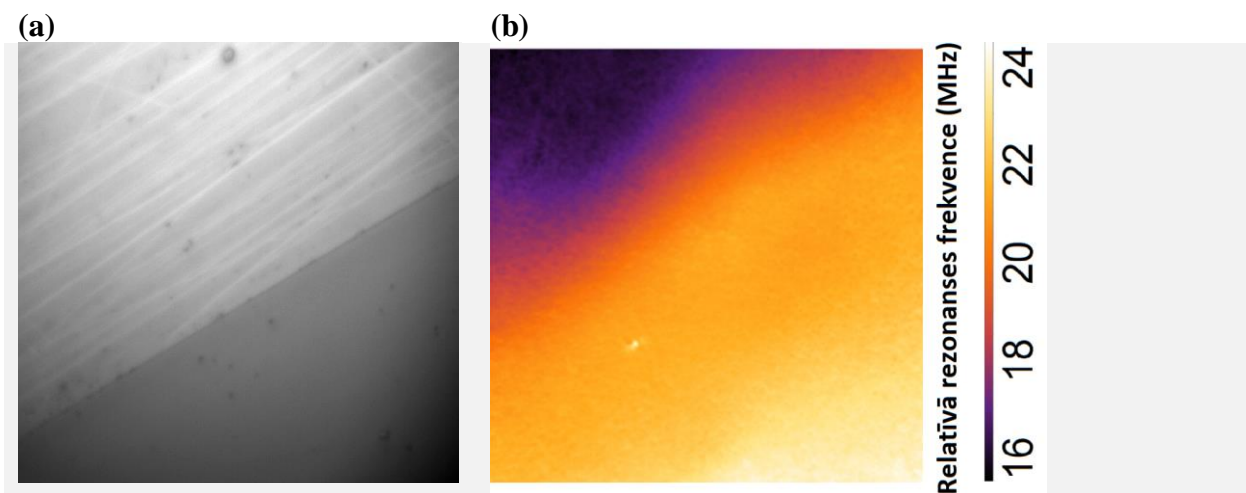
(b)





Attēls 5.4 : Plānās kārtiņas parauga nr. 2 magnētiskā lauka mērījumi, izmantojot abu magnētisko apakšlīmeņu mērīšanas metodi : starp materiāla pārejām - 1. rinda; gaišās līnijas apgabalā – 2.rinda.

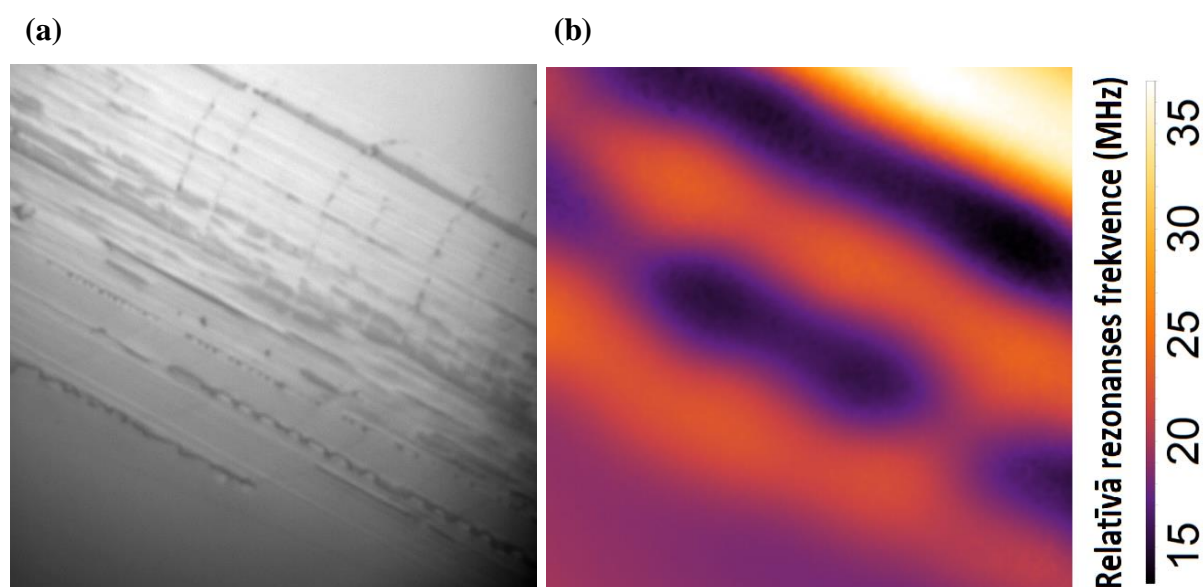
Kā alternatīvs risinājums optiskajā sistēmā tika ieviests koherences jaucējs, tā mērķis ir nodrošināt fāžu atšķirību lāzera gaismas staram. Nekoherentā gaisma, atstarojoties pret plāno kārtiņu, vairs neradīja interferences joslas uz dimanta, tādējādi atrisinot aktuālo problēmu (attēls 5.5). Šis risinājums arī ļauj veikt magnētiskā lauka mērīšanu ar sākotnējo metodiku, t.i. mērīt tikai viena magnētiskā apakšlīmeņa rezonanse frekvenci.



Attēls 5.5 : Parauga nr. 2 mērījums starp materiālu pārejām pēc koherences jaucēja ieviešanas optiskajā sistēmā: (a) optiskais attēls; (b) magnētiskā lauka attēls.

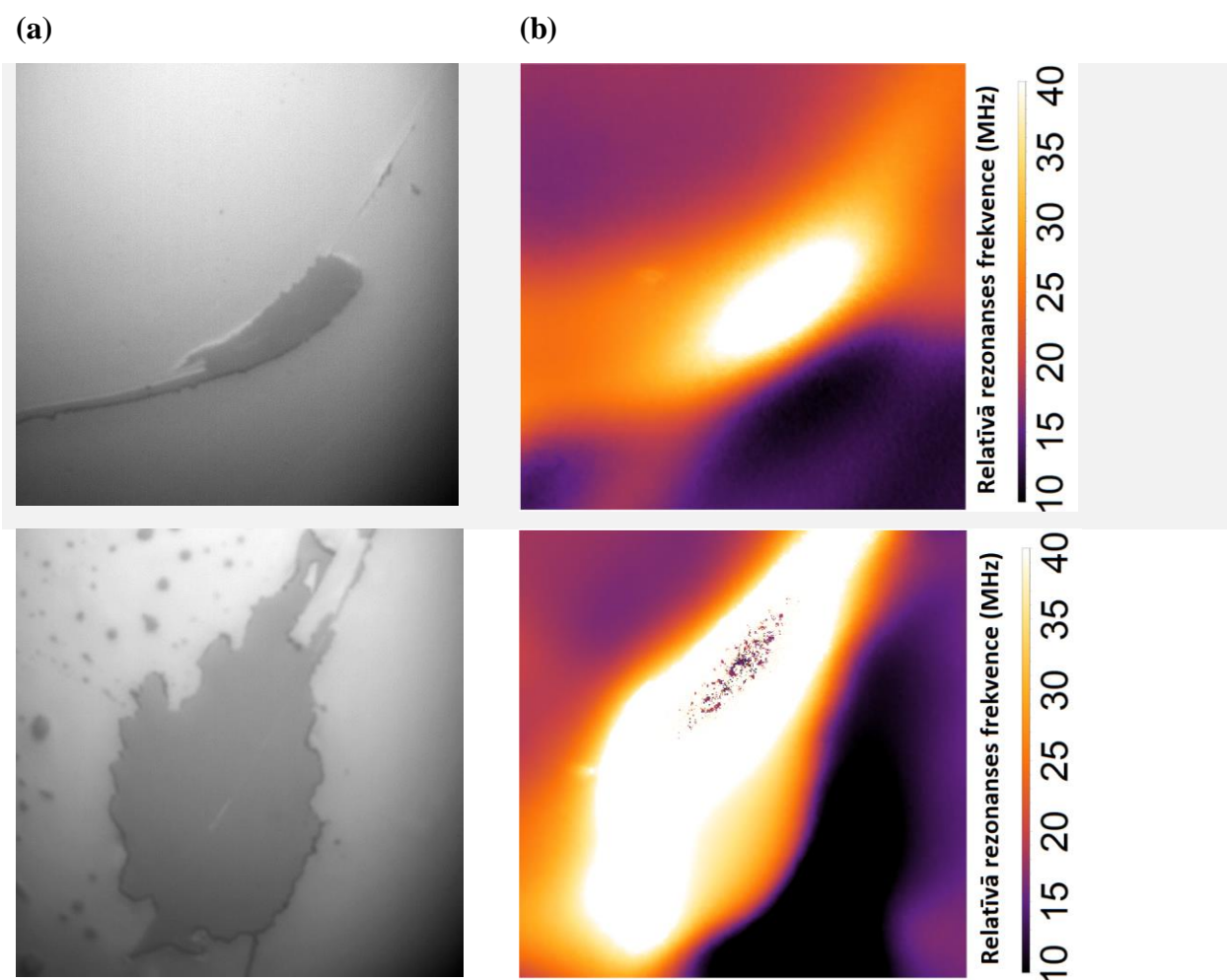
Parauga nr. 2 magnētiskajos attēlos novērojami lokāli magnētiskie signāli, kurus rada optiski detektējami tumši plankumi (attēls 5.4). Izmantojot koherences jaucēju, magnētiskajos attēlos (attēls 5.5) netiek vairs novērota interferences efekti, un redzamajā magnētiskajā gradientā nav redzama materiāla robeža.

Bez plāno kārtiņu audzēšanas defektiem tika apskatītas arī magnētisko signālu izmaiņas plānajām kārtiņām, kas pakļautas mehāniskām mijiedarbībām. Šī uzdevuma pētniecībā izmantota plānā kārtiņa, kas sastāv no silīcija pamatnes un ~500 nm biezas dzelzs kārtiņas. Pirmais defektu veids, kas tiek apskatīts, ir līnijveidīgi mehāniskie defekti, tos izveido pārvelkot pāri plānās kārtiņas virsmai ar papīra nazis (attēls 5.6)



Attēls 5.6 : Līnijveida defektu radīto magnētisko signālu izpēte. (a) Optiskais attēls, (b) magnētiskā lauka attēls.

Punktveida mehāniskie defekti ir nākošais izpētēs objekts. Defektu iegūšanai šujamادات spicais gals tiek perpendikulāri novietots pret plānās kārtiņas virsmu un ar nelielu spēku tiek uzsists pa adatas otru galu. Šo defektu izpētē tiek izmantota jauna, gluda ~500 nm bieza dzelzs plānā kārtiņa. Plānās kārtiņas cietības, trausluma un gludās virsmas dēļ defektu izveidošanas process sagādāja problēmas, bet iegūtie defekti ir viegli novērojami (attēls 5.7)

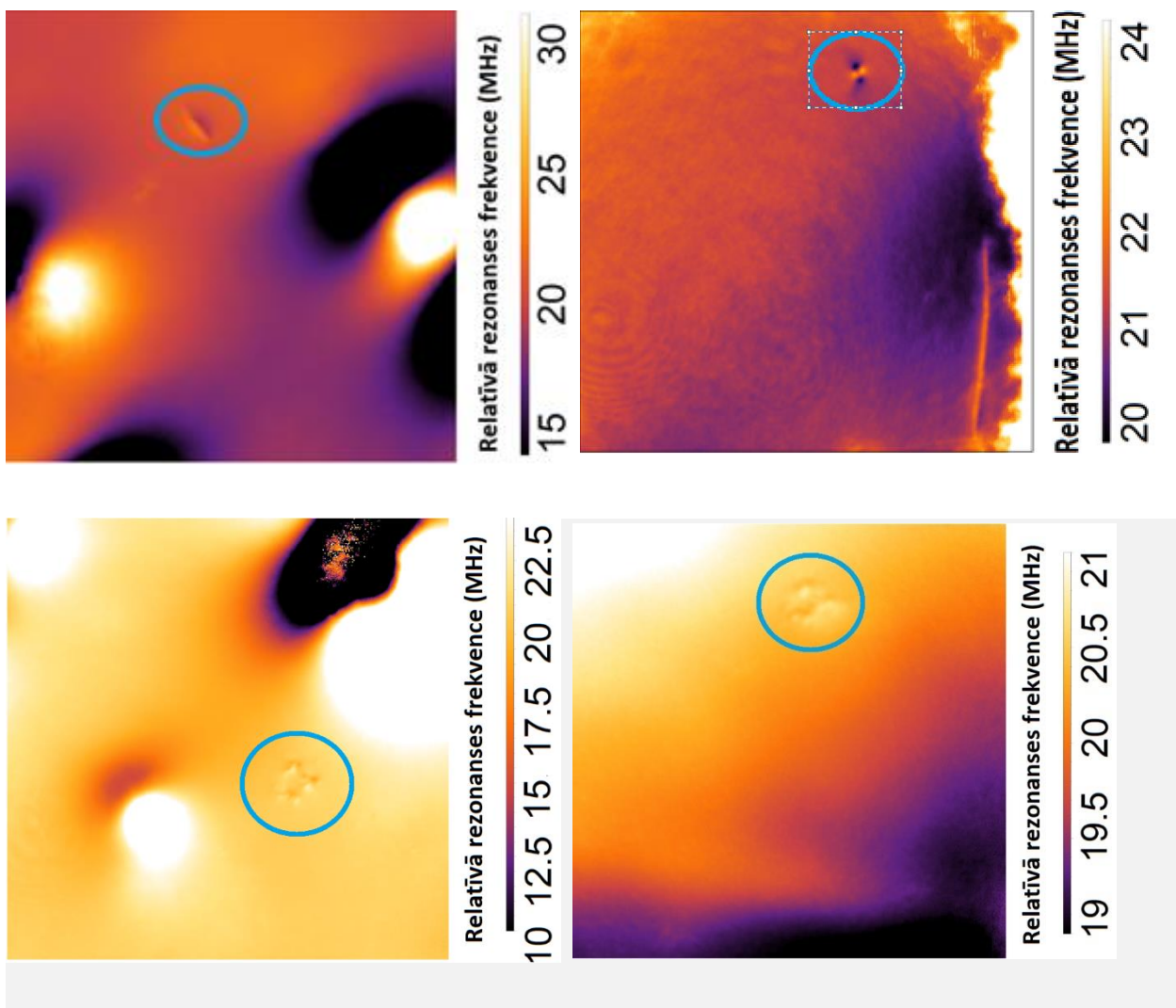


Attēls 5.7: Punktveida defektu radīto magnētisko signālu izpēte. Kolonna (a) optiskais attēls, kolonna (b) magnētiskā lauka attēls.

Viennozīmīgi redzams, ka radītie mehāniskie defekti izraisa magnētiskā lauka anomālijas dzelzs plānajās kārtiņās. Tomēr optiski novērojot, var secināt, ka izveidotie defekti ir dziļāki bojājumi nekā novērotie virsmas defekti paraugos nr. 3, 4, un 5. Par to liecina norautā gaišā virsmas kārtā, kā rezultātā var novērot nākamo slāni (kārtiņu). Diemžēl, mēģinājumi radīt skrāpējumus, kas līdzinātos novērotajiem paraugos nr. 3, 4, un 5, rezultējās nesekmīgi. Tādēļ ir grūti spriest par šo gaišo līniju izcelsmi. Mehānisko defektu izpētē netika pētīti paraugi nr. 1 un 2, jo šīs plānās kārtiņas ir tikai vienā eksemplārā un tiks izmantotas citos eksperimentos.

Plāno kārtiņu pētniecības laikā ir novēroti magnētiskie signāli, kuru izcelsme rodas no izmantotā dimanta. Attēlā 5.8 ir apkopoti magnētiskā lauka attēli, kuros nav novērojami optiski

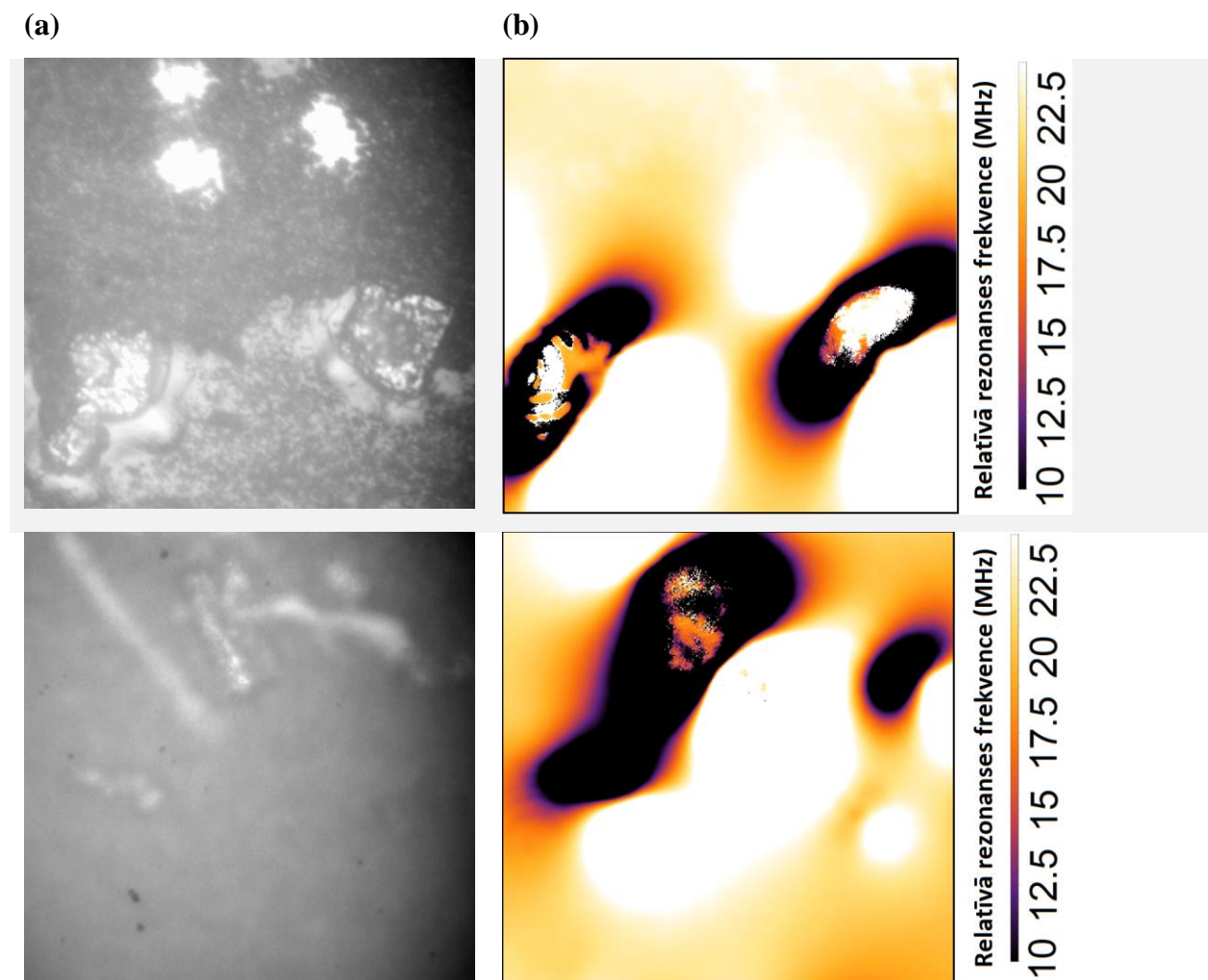
detektējami defekti, kas atbilstu smalko magnētisko signālu struktūrām, bet, kas ir dimanta iekšējo defektu radīti magnētiskie signāli (atzīmēts ar zilu). Šie signāli rodas, lokālu elektrisko lauku izmaiņas dēļ.



Attēls 5.8 : Plāno kārtiņu magnētisko lauku attēli, kuros novērojami dimanta kristāla struktūras defekti.

Pētījumos tika novērots, ka atsevišķos mērījumos (apkopotā attēlā 5.9) plāno kārtiņu lokālie magnētiskie lauki ir pārāk spēcīgi, lai noteiktu magnētiskās rezonances frekvenci konkrētajā punktā, proti, plānās kārtiņas magnētiskais lauks konkrētajā punktā ir pietiekami stiprs (virs 7 G, atbilstoši 20 MHz), lai radītu pietiekami lielu NV centra magnētiskā apakšlīmeņa enerģijas

izmaiņu, kas ir ārpus MW skenēšanas diapazonam. Šādos punktos – pikseļos datu apstrādes programma OMDR spektrā atrod vislielāko troksni un tam tiek piedzīta Gausa funkcija, no kuras arī tiek iegūta rezonanse frekvences vērtība. Problēmas risinājums būtu palielināt MW skenēšanas diapazonu, lai iegūtu korektus datus. Tomēr šādas problēmas ir sastopamas reti, līdz ar to lielākajā daļā mērījumu pietika ar 40 MHz skenēšanas platumu.



Attēls 5.9 : Plānās kārtiņas parauga nr. 1 mērījumi apgabalos, kur lokālie magnētiskie lauki ir stiprāki par 7 G.

6. SECINĀJUMI

Šī darba izstrādes gaitā izveidota un uzlabota eksperimentālā iekārta, kas balstās uz optiski detektētās magnētiskās rezonanses telpisku mērīšanu plānā slāpekļa vakancu krāsu centru slānī. Eksperimentālās iekārtas uzlabojumu vidū minami gan mehāniskās stabilitātes uzlabojumi, gan atbrīvošanās no temperatūras radītiem efektiem, gan interferences rašanās novēršana. Izmantojot magnētiskā lauka attēlošanu, noteikti dažādu magnētisku plānu kārtiņu magnētiskās īpašības.

Izmantojot optisko attēlu korelāciju ar magnētiskajiem izdevies identificēt konkrētus magnētisku defektu veidus un raksturot to īpašības, kā arī daļēji tās skaidrot no izmantoto materiālu fizikālo īpašību viedokļa.

Atbilstoši darba uzdevumiem izpētīti:

Plānās kārtiņās, kas veidotas no $(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{GaC}$, optiski identificēti kristāliski savienojumi Mn_5Ga_8 vai Cr_5Ga_8 - kopējais iegūtais attēlu skaits ar kārtu 30. Ar vanādiju pārklātās dzelzs plāno kārtiņu izpētē uzņemti 7 magnētiskie attēli.

Mehānisku defektu izpētē uzņemti 3 līnijveida defektu magnētiskie attēli, 9 punktveida defektu magnētiskie attēli.

Izveidotā eksperimentālā iekārta ir veiksmīgi pierādījusi savu spēju uzņemt mikroskopisku struktūru radīto magnētisko signālu. Tā tikusi optimizēta dažādu plāno kārtiņu izpētei, un to var izmanto ne tikai plāno kārtiņu pētīšanai. Potenciāli šai iekārtai ir laba iespēja aizpildīt nišu starp diva veida magnetometriem, vieni ar izcilu telpisko izšķirtspēju, bet relatīvi lēnu mērīšanas procesu, kad runa iet par struktūrām ar dažu desmitu mikrometru izmēriem. Un otri, kuriem ir lieliska magnētiska lauka jutība, bet vāja telpiskā izšķirtspēja.

Tāpat jāmin, ka šai metodei ir labs potenciāls uz ātru mērījumu veikšanu (augstu caurlaidspēju), jo darbā aprakstītā metode izmanto relatīvi detalizētu mikroviļņu frekvences skanu, ko varētu aizstāt ar tikai dažu punktu mērījumiem, ja nepieciešams tikai detektēt vai ir novirzes no plānotā rezultāta.

7. PATEICĪBAS

Darba autors pateicas Latvijas Universitātes Lāzera Centra kolektīvām par pieredzes pilnu sadarbību.

Īpaši pateicos pētniekam Dr. Phys. Andrim Bērziņam par iespēju piedalīties NV centru izpētes projektā, par fantastisku bakalaura darba vadīšanu.

Pateicos pētniekiem Jānim Šmitam un Reinim Lazda par veltīto laiku teorijas paskaidrošanai un palīdzību tehnisko jautājumu atrisināšanā.

8. IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] K. Nemoto *et al.*, “Photonic Quantum Networks formed from NV– centers,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 26284, Sep. 2016.
- [2] J. L. Han, “Observing Interstellar and Intergalactic Magnetic Fields,” *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 55, no. 1, pp. 111–157, Aug. 2017.
- [3] M. W. Dale and G. W. Morley, “Medical applications of diamond magnetometry: commercial viability,” May 2017.
- [4] L. Rondin, J.-P. Tetienne, T. Hingant, J.-F. Roch, P. Maletinsky, and V. Jacques, “Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond,” Nov. 2013.
- [5] F. Dolde *et al.*, “Sensing electric fields using single diamond spins,” Mar. 2011.
- [6] J. Wang *et al.*, “High-Sensitivity Temperature Sensing Using an Implanted Single Nitrogen-Vacancy Center Array in Diamond,” Oct. 2014.
- [7] M. P. Ledbetter, K. Jensen, R. Fischer, A. Jarmola, and D. Budker, “Gyroscopes based on nitrogen-vacancy centers in diamond,” *Phys. Rev. A*, vol. 86, no. 5, p. 052116, Nov. 2012.
- [8] L. Rondin, J. P. Tetienne, T. Hingant, J. F. Roch, P. Maletinsky, and V. Jacques, “Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond,” *Reports on Progress in Physics*. 2014.
- [9] M. W. Doherty *et al.*, “Measuring the defect structure orientation of a single NV-centre in diamond,” *New J. Phys.*, vol. 16, 2014.
- [10] W. L. Song, W. L. Yang, Z. Q. Yin, C. Y. Chen, and M. Feng, “Controllable quantum dynamics of inhomogeneous nitrogen-vacancy center ensembles coupled to superconducting resonators,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. February, pp. 1–12, 2016.
- [11] A. Haque and S. Sumaiya, “An Overview on the Formation and Processing of Nitrogen-Vacancy Photonic Centers in Diamond by Ion Implantation,” *J. Manuf. Mater. Process.*, 2017.
- [12] V. M. Acosta, “Optical magnetometry with Nitrogen-vacancy centers in diamond,” pp. 26–29, 2011.
- [13] J. P. King *et al.*, “Room-temperature in situ nuclear spin hyperpolarization from optically

- pumped nitrogen vacancy centres in diamond,” *Nat. Commun.*, vol. 6, no. January, 2015.
- [14] J. Harrison, M. J. Sellars, and N. B. Manson, “Optical spin polarisation of the N-V centre in diamond,” *J. Lumin.*, vol. 107, no. 1–4, pp. 245–248, 2004.
- [15] M. Auzinsh *et al.*, “Hyperfine level structure in nitrogen-vacancy centers near the ground-state level anticrossing,” pp. 1–13, 2018.
- [16] J. Smits *et al.*, “Estimating the magnetic moment of microscopic magnetic sources from their magnetic field distribution in a layer of nitrogen-vacancy (NV) centres in diamond,” *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 73, no. 2, p. 20701, 2016.
- [17] Simon Rochester and Dmitry Budker, “Budker Group Physics Tutorials.” [Online]. Available: <http://budker.berkeley.edu/Tutorials/index.html>. [Accessed: 29-May-2019].
- [18] K. Jeong, A. J. Parker, R. H. Page, A. Pines, C. C. Vassiliou, and J. P. King, “Understanding the Magnetic Resonance Spectrum of Nitrogen Vacancy Centers in an Ensemble of Randomly Oriented Nanodiamonds,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 121, no. 38, pp. 21057–21061, 2017.
- [19] T. Mittiga *et al.*, “Imaging the local charge environment of nitrogen-vacancy centers in diamond,” Sep. 2018.
- [20] D. A. Broadway *et al.*, “Spin dynamics of diamond nitrogen-vacancy centres at the ground state level anti-crossing and all-optical low frequency magnetic field sensing,” pp. 1–10, 2016.
- [21] M. Auzinsh *et al.*, “Hyperfine level structure in nitrogen-vacancy centers near the ground-state level anticrossing,” pp. 1–13, 2018.
- [22] H. Zheng *et al.*, “Microwave-free vector magnetometry with nitrogen-vacancy centers along a single axis in diamond,” 2019.
- [23] R. Fischer, A. Jarmola, P. Kehayias, and D. Budker, “Room-temperature optical polarization of nuclear ensembles in diamond,” *ArXiv: quant-ph*, pp. 1–10, 2012.
- [24] S. Choe *et al.*, “Precise temperature sensing with nanoscale thermal sensors based on diamond NV centers,” *Curr. Appl. Phys.*, 2018.
- [25] J. M. Schloss, J. F. Barry, M. J. Turner, and R. L. Walsworth, “Simultaneous Broadband

Vector Magnetometry Using Solid-State Spins,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 10, no. 3, p. 1, 2018.

- [26] O. R. Rubinas *et al.*, “Spin properties of NV centers in high-pressure, high-temperature grown diamond,” Jun. 2018.

9. DOKUMENTĀRĀ LAPA

Bakalaura darbs „Plāno kārtiņu magnētisko īpašību izpēte, izmantojot slāpekļa vakanču centrus dimanta kristālā” izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: _____/Artūrs Smiltnieks/

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr. Phys. Andris Bērziņš _____ 30.05.2019.

Recenzents: Dr. Phys. Jānis Alnis

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā __.05.2019.

Dekāna pilnvarotā persona: vecākā metodiķe Dzintra Holsta

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

__.__.2019. prot. Nr._____, vērtējums _____

Komisijas sekretārs: _____