

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2023 546**
(22) Paraiškos padavimo data: **2023-12-11**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2025-06-25**
(45) Patento paskelbimo data: **2025-07-25**

(73) Patento savininkas:
Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, LT

Vilniaus universitetas, Universiteto g. 3, 01131 Vilnius, LT

(72) Išradėjas:
Artūras ULČINAS, LT
Šarūnas VAITEKONIS, LT
Viktor NOVIČENKO, LT

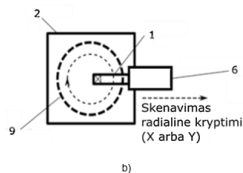
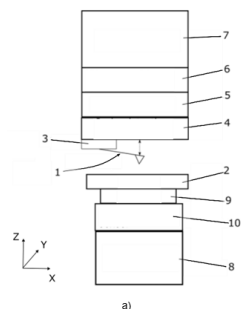
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Aušra PAKĖNIENĖ, 50, AAA Law, A. Goštauto g. 40B, Verslo centras „Dvyniai“, LT-03163 Vilnius, LT

LT 7145 B

(54) Pavadinimas:
Didelio ploto našus skenuojančio zondo mikroskopas ir didelio ploto našus sukimo skenavimo būdas

(57) Referatas:

Atskleidžiami būdas ir aparatas, skirti paviršiams tirti skenuojančio zondo būdu ir leidžiantys pasiekti didelį skenavimo greitį ir duomenų gavimo našumą bei tinkami didelių matmenų bandiniams. Sukimo ir tiesinio judesio derinys naudojamas skenuoti paviršių koncentrinį apskritimų arba spiraline trajektorijomis persiklojančių žiedų būdu. Aprašomi būdas ir aparatas, skirti sparčiam polinkio sąlygotam zondo-paviršiaus atstumo kitimo kompensavimui ir tinkami aprašytam skenavimo būdui.



1 pav.

TECHNIKOS SRITIS

Šis išradimas priklauso paviršiaus savybių matavimo prietaisų sričiai, įskaitant prietaisus, naudojančius zondus svirtelių pagrindu ir skenuojančio zondo mikroskopus, pvz., atominių jėgų mikroskopus (AJM).

TECHNIKOS LYGIS

Skenuojančio zondo mikroskopas (SZM) ir jo variantas, atominių jėgų mikroskopas (AJM) – tai prietaisai, skirti gauti įvairių paviršiaus savybių vaizdus labai aukšta erdvine skyra, ir skirti moksliniams tyrimams ir gamybinių procesų kontrolei tokiose srityse, kaip medžiagų mokslas, biologija, puslaidininkių technologija ir t.t. Jų veikimas remiasi registracija duomenų, apibūdinančių sąveiką tarp zondo ir tiriamojo paviršiaus, zondui judant –skenuojant - paviršių. Aukšta šio būdo skyra kyla iš erdvėje apriboto sąveikos tarp zondo ir paviršiaus tūrio, ir siekia nanometrų, o tam tikrais atvejais sub-nanometrų lygmenį.

Vienas svarbių vis dar esančių SZM taikymo apribojimų yra susijęs su ribota duomenų išeiga, kurią galima įvertinti kaip laiką, reikalingą gauti tam tikro paviršiaus ploto vaizdą pageidaujama erdvine skyra. Šis apribojimas kyla iš nuosekliojo (taškas-po-taško) duomenų registracijos būdo zondui skenuojant paviršių, ir labiausiai sietinas su elektromechaninės sistemos (skenerio), skirtos zondui skenuoti erdvėje (X, Y ir Z koordinatėse) paviršiaus atžvilgiu, ribotu dažnių juostos pločiu. Žadinant skenerį didesniu nei rezonansinis dažniu, sužadinamos nepageidaujamos mechaninės vibracijos, kurių pasekmė – nenuspėjama skenerio erdvinė padėtis ir didelė skenerio sugadinimo tikimybė. Dabartinės pažangiausios didelės spartos SZM sistemos iki šiol koncentravosi į skenavimo greičio didinimą didinant skenuojančios struktūros standumą, tuo būdu padidinant rezonansinį dažnį. Nors šis būdas leidžia gauti labai didelę vaizdų generavimo spartą (iki 1000 kadrų per sekundę), jis ženkliai sumažina galimą skenuoti plotą [1].

Siekiant padidinti skenuojamą plotą, reikalinga papildoma didesnės eigos skenavimo sistema, kurios pagalba bandinys zondo atžvilgiu perstumiamas X ir Y koordinatėse, su toliau sekančiu atskirų mažo ploto vaizdų sujungimu į kompozicinį vaizdą. Tiksliam sujungimui gauti, didesnio ploto skeneris turi atitikti griežtus metrologinius reikalavimus [2][3]. Be to, šis būdas ženkliai apriboja svorį ir matmenis

arba bandinio, arba SZM detekcijos sistemos, priklausomai nuo to, kuris jų yra skenuojamas.

Kitas būdas padidinti skenavimo greitį yra naudoti glotnias skenavimo trajektorijas, tokias kaip spiralinę, Lisažu, cikloidinę ir kitas, žadinant ortogonalų ašių skenerį (XY) specialiai suformuotais valdymo signalais su po to einančiu registruojamų duomenų perskaiciavimu suformuojant įprastinį vaizdą. Šis būdas taip pat pasižymi ribotu skenuojamo ploto dydžiu. JAV patento paraiškoje Nr.:US15/235717 (publikacijos Nr.: US20170047199A1) yra aprašomas litografinių raštų formavimui skirtas būdas.

Tarptautinėje paraiškoje Nr.: PCT/US2021/045614 (publikacijos Nr.: WO2022036008) yra aprašomas už SZM srities ribų, oftalmoskopijai skirtas litografinių raštų formavimo būdas. Skenavimo signale naudojami pastovaus kampinio greičio, pastovaus linijinio greičio ir pereinamasis segmentai.

Artimiausias analogas yra būdas, atskleistas [4][5], kur SZM profilometrijoje yra taikomas būdas aprašytas JAV patente Nr.: US10735674B2. Būdas yra skirtas pasiekti didelio proto ir greičio skenavimą vaizdams formuoti, generuojant spiralines ar koncentrinų apskritimų skenavimo trajektorijas jungiant sukamąjį ir radialinį judėjimą. Pagrindinis būdo trūkumas yra erdvinės skyros, linijinio ir kampinio skenavimo greičio apribojimas.

Panaši koncepcija, naudojant sukamąją ašį kaip greito skenavimo ašį ir išvengiant netolygaus (trūkuso) skenerio judėjimo aukštuose dažniuose, leido pasiekti ženkliai didesnį skenavimo greitį ir erdvinę skyrą, tačiau santykinai nedideliu skenavimo plotui [6].

Šiuo išradimu siekiama įveikti aukščiau aprašytus apribojimus ir pasiekti kitus privalumus žinomų sprendimų atžvilgiu.

IŠRADIMO ESME

Pagal pirmąjį išradimo aspektą, skenuojančio zondo mikroskopas apima kelių lygių radialinio pozicionavimo sistemą, apimančią pirmąjį pozicionavimo stalėlį su nanometrinės skyros pozicionavimo galimybe, pvz., pjezoelektrinį akuatorių, ir nepriklausomą (uždaros grandinės) padėties jutiklį, pvz., talpuminį ar pjezorezistyvinį

jutiklį, toliau vadinamą nanoskeneriu. Nepriklausomas koordinatės registravimas taip pat gali būti vykdomas išorinės sistemos, pvz., lazerinio interferometro, pagalba. Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima dar bent vieną sekančio lygio pozicionavimo stailę, turintį ženkliai didesnę pozicionavimo eigą palyginti su pirmuoju stailiu, pvz., motorizuotą pozicionavimo stailę, toliau vadinamą mikroskeneriu.

Pagal antrąjį išradimo aspektą, paviršiaus skenavimo būdas, taikomas skenuojančio zondo mikroskope pagal pirmąjį išradimo aspektą, pasižymi tuo, kad paviršius yra skenuojamas persiklojančių žiedų būdu, kur atstumas tarp žiedų ir persiklojanti dalis yra valdoma didelės eigos pozicionavimo stailiu, o skenavimas žiedo viduje vykdomas nanometrų eilės skyrą turinčiu stailiu. Duomenų registravimas pagal aprašomą būdą vykdomas vienu metu ir sinchroniškai, registruojant signalą, atitinkantį sąveiką tarp zondo ir paviršiaus, ir signalą, atitinkantį paviršiaus sukimąsi zondo atžvilgiu, tokiu būdu, kad būtų pakankamu tikslumu registruojami matuojamos paviršiaus savybės duomenų taškas ir šio taško azimuto koordinatė. Duomenų taškų tankio nevienodumas yra mažinamas proceso metu reguliuojant kampinį greitį, priklausomai nuo radialinės koordinatės. Paviršiaus polinkio zondo atžvilgiu sąlygotas atstumo kitimas, paviršiui sukantis zondo atžvilgiu, yra kompensuojamas.

Išradimas leidžia realizuoti pozicionavimo, valdymo ir duomenų registracijos sistemą didelio ploto skenavimui. Išradimas leidžia pasiekti didelius skenavimo greičius ir duomenų registracijos našumą paviršiaus tyrimo prietaisuose, naudojančiuose strypelio tipo jutiklius. Išradimas taip pat leidžia įgyvendinti atstumo tarp zondo ir paviršiaus kitimo dėl zondo ir paviršiaus polinkio spartų valdymą, tuo pat metu sumažinant metrologinius reikalavimus vienai koordinačių ašiai ir įgalinant skenuoti didelių matmenų bandinius. Aprašomas išradimas patobulina skenavimo sistemą, naudojančią sukimo ir linijinio judesio derinį, skirtą skenuoti zondo paviršiaus atžvilgiu, ženkliai padidinant pasiekiamą tiriamą paviršiaus plotą ir duomenų našumą, be žymesnio skyros sumažėjimo.

TRUMPAS BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Išradimo, kuris yra naujas ir neakivaizdus, ypatybės yra pateikiamos apibrėžties punktuose. Tačiau išradimas gali būti geriausiai suprantamas remiantis šiuo išsamiau išradimo aprašymu, kuriame, neribojant išradimo esmės, aprašomi

pavyzdiniai išradimo variantai yra pateikti kartu su pridedamais brėžiniais, kuriuose:

1 pav. a) ir b) pateikia skenuojančio zondo mikroskopo pagal išradimą realizacijos pavyzdžio funkcinę blokinę diagramą.

2 pav. parodo skenavimo diagramą, taikant sukimo-linijinio pozicionavimo derinį ir persiklojančių žiedų skenavimą: a) koncentrinių apskritimų skenavimo trajektorija; b) spiralinė skenavimo trajektorija; c) persiklojanti skenavimo trajektorija.

3 pav. parodo skenuojančio zondo mikroskopo duomenų apdorojimo dalies duomenų srautų funkcinę blokinę diagramą.

4 pav. parodyti elektroninių signalų, skirtų generuoti paviršiaus vaizdus ir registruotų sinchroniniu būdu, grafikai, taikant skenavimo trajektorijas : a) paviršiaus profilį atitinkantis, zondo detekcijos jutiklio generuojamas zondo signalas; b) nanopozicionavimo valdiklio generuojamas radialinės koordinatės signalas; c) sukimosi jutiklio generuojamas sukimo detekcijos signalas; d) duomenų registracijos ir apdorojimo įtaisų apskaičiuotas azimuto koordinatės signalas.

5 pav. parodytas tipinis kalibracinės gardelės, turinčios nominalų 21 nm struktūrų aukštį, paviršiaus profilio vaizdas, suformuotas skenuojančio zondo mikroskopo, taikant išradime aprašomą būdą.

6 pav. parodyta polinkio sąlygoto zondo-paviršiaus atstumo kitimo kompensacijos valdiklio funkcinę blokinę diagramą.

7 pav. parodyta harmoninio osciliatoriaus perdavimo funkcijos vidinės struktūros funkcinė-blokinė diagrama.

8 pav. parodyta nulinio laipsnio harmoninio osciliatoriaus perdavimo funkcijos funkcinė-blokinė diagrama.

Tinkamiausi išradimo variantai yra aprašyti žemiau su nuorodomis į brėžinius. Kiekviename paveikslėlyje yra pateikiama ta pati to paties ar lygiaverčio elemento numeracija.

IŠSAMUS IŠRADIMO APRAŠYMAS

Turėtų būti suprantama, kad daugybė konkrečių detalių yra išdėstytos, siekiant pateikti pilną ir suprantamą išradimo pavyzdinio įgyvendinimo aprašymą. Tačiau srities

specialistui bus aišku, kad išradimo įgyvendinimo pavyzdžių detalumas neapriboja išradimo įgyvendinimo, kuris gali būti įgyvendintas ir be tokių konkrečių nurodymų. Gerai žinomi būdai, procedūros ir sudedamosios dalys nebuvo detalai aprašyti, kad išradimo įgyvendinimo pavyzdžiai nebūtų klaidinantys. Be to, šis aprašymas neturi būti laikomas apribojančiu pateiktus įgyvendinimo pavyzdžius, o tik kaip jų įgyvendinimas.

Pagal vieną išradimo aspektą, atskleidžiamas skenuojančio zondo mikroskopas. Skenuojančio zondo mikroskopas apima zondą (1), skirtą skenuoti bandiniui (2), zondo (1) laikiklį (3), zondo detekcijos jutiklį (4), pirmąjį pozicionavimo įrenginį – Z-ašies nanopozicionierių (5), ir antrąjį pozicionavimo įrenginį – XY-ašių nanopozicionierių. Abu pozicionavimo įrenginiai turi pjezoaktuatorius ir galimybę nustatyti poziciją nanometrų lygmens skyra. XY nanopozicionierius turi nepriklausomus (uždaros grandinės) jutiklius, tokius kaip talpuminiai ar pjezorezistyvieniai jutikliai, ir toliau tekste įvardijamas kaip nanoskeneris (6). Alternatyviuoju būdu, nepriklausomas pozicijos nuskaitymas gali būti atliekamas išorinės sistemos pagalba, pvz., lazeriniu interferometru. Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima trečiąjį pozicionavimo įrenginį – Z-ašies mikropozicionierių (7). Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima ketvirtąjį pozicionavimo įrenginį – XY-ašių mikropozicionierių. XY-ašių mikropozicionierius turi ženkliai didesnę pozicionavimo eigą nei nanoskeneris (6), ir gali būt, pvz., motorizuotas linijinio pozicionavimo įrenginys, o toliau tekste įvardijamas kaip mikroskeneris (8). Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima sukimo variklį (9). Sukimo variklis naudojamas realizuoti bandinio (2) sukamąjį judėjimą zondo (1) atžvilgiu. Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima sukimo registracijos jutiklį (10). Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima nanopozicionavimo valdiklį (11), kuris kontroliuoja Z-ašies nanopozicionieriaus (5) ir nanoskenerio (6) pozicijas ir teikia atitinkamų nepriklausomų pozicijos jutiklių duomenis. Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima mikropozicionavimo valdiklį (12), kuris kontroliuoja Z-ašies mikropozicionieriaus (7) ir mikroskenerio (8) pozicijas ir teikia atitinkamų pozicijų duomenis. Skenuojančio zondo mikroskopas taip pat apima duomenų registracijos ir apdorojimo įtaisą (13), sukimo variklio valdiklį (14) ir įvesties-duomenų pateikimo įtaisą (15).

Z-ašies nanopozicionierius (5) ir Z-ašies mikropozicionierius (7) yra naudojami pozicionuoti zondą (1) bandinio (2) atžvilgiu, (Z) ašies kryptimi, iš esmės statmenai

bandinio (2) plokštumai.

1 pav. yra parodyta skenuojančio zondo mikroskopo pagrindinių komponentų funkcinė diagrama. Zondas (1) – tai strypelio tipo zondas, skirtas tirti tam tikrai bandinio (2) paviršiaus savybei, pvz., paviršiaus profiliui. Zondo (1) ir bandinio (2) paviršiaus sąveika detektuojama zondo detekcijos jutikliu (4), pvz., veikiančiu optinio sverto ar interferometro principu. Atstumas tarp zondo (1) ir bandinio (2) valdomas Z-ašies nanopozicionieriumi (5), turinčiu sub-nanometrinę skyrą Z-ašyje. Nanoskeneris (6) realizuoja zondo (1) judėjimą bandinio (2) atžvilgiu, suteikdamas galimybę pozicionuoti zondą (1) tam tikroje paviršiaus vietoje arba skenuoti paviršių įprastiniu būdu, ar valdyti koordinatę bet kuria pasirinkta radialine kryptimi (X arba Y). Z-ašies mikropozicionierius (7) leidžia dideliu žingsniu reguliuoti atstumą tarp zondo (1) ir bandinio (2). Sukimo variklis (9), pvz., bešepetėlinis nuolatinės įtampos variklis, leidžia vykdyti zondo (1) sukimą bandinio (2) atžvilgiu. Sukimo variklio (9) sukimąsi registruoja sukimosi jutiklis (10), kuris generuoja elektrinį signalą, atitinkantį tam tikrą sukimosi variklio (9) kampinę padėtį. Sukimosi jutiklis (10) gali būti, pvz., šviesos modulatoriaus tipo įtaisas, kuriame šviesa periodiškai praeina pro ertmės, suformuotas prie sukimosi variklio (9) pritvirtintame diske, ir registruojama fotodetektoriumi (neparodytas). Mikroskeneris (8) leidžia dideliu žingsniu, bandinio (2) atžvilgiu, pozicionuoti zondą (1) plokštumoje, iš esmės lygiagrečioje tiriamajam paviršiui.

2 pav. iliustruoja skenavimo schemą ir skenavimo strategijas, aktualias rekomenduojamam įgyvendinimui. Sukimo varikliui (9) besisukant ir nanoskaneriui (6) tiesiškai judant radialine X arba Y kryptimi, zondas (1) skenuoja bandinio (2) paviršių, sekdamas koncentrinę apskritimų trajektoriją (16) arba spiraline trajektorija (17), priklausomai nuo to, ar nanoskeneris (6) juda žingsneliais ar nuosekliai, besisukant sukimo varikliui (9). Punktyrinės linijos žymi diskretinį registravimą elektrinių signalų, nusakančių zondo (1) radialinę koordinatę R bandinio (2) atžvilgiu ir sukimo variklio (9) kampinę koordinatę θ . Jei sukimo variklis (9) sukasi pastoviu kampiniu greičiu ω , kampinės koordinatės skyra $\Delta\theta = \omega / SR$, kur SR – duomenų registracijos ir apdorojimo įtaiso (13) diskretizacijos sparta. ΔR žymi žingsnio ilgį radialine kryptimi koncentrinę apskritimų trajektorijos (16) atveju.

Siekiant gauti nanometrų eilės skyrą, didelį skenavimo plotą ir greitą skenavimą, radialinės krypties tiesinio pozicionavimo sistema turi kelis įtaisus: XY-ašių mikroskenerį (8) ir XY-ašių nanoskenerį (6). Mikroskeneris (8) – motorizuotas tiesinio

pozicionavimo įrenginys, turintis ženkliai didesnę eigą, nei nanoskeneris (6). Nanoskeneris (6) ir mikroskeneris (8) tvirtinami taip, kad jų pozicionavimo ašys būtų iš esmės lygiagrečios. Tokia hibridinė skenavimo sistema veikia generuodama koncentrinę arba perslinktą persiklojančių žiedų (18) skenavimo trajektorijas, parodytas 2 pav. kaip skirtingai štrichuoti plotai. Nanometrinės skyros koncentrinės (16) arba spiralinės (17) trajektorijos su laisvai parenkamu žingsniu žiedų viduje generuojamos nanoskeneriu (6), o pozicionavimas tarp žiedų (18) realizuojamas mikroskeneriu (8). Nanoskenerio (6) ir mikroskenerio (8) koordinatės jutiklių duomenys sujungiami, gaunant radialinę koordinatę. Alternatyviu būdu, radialinės koordinatės nuskaitymas gali būti atliekamas išorinės sistemos, pvz., lazerinio interferometro, pagalba. Persiklojimo tarp žiedų (18) dalis gali būti operatoriaus laisvai parenkama.

3 pav. yra parodyta skenuojančio zondo mikroskopo komponentų, skirtų signalams generuoti ir duomenims perduoti bei apdoroti, funkcinė diagrama. Nanopozicionavimo valdiklis (11) kontroliuoja Z-nanopozicionieriaus (5) ir nanoskenerio (6) koordinates ir perduoda atitinkamų koordinatės jutiklių duomenis į duomenų registracijos ir apdorojimo įtaisą (13). Tokiu pat principu, mikropozicionavimo valdiklis (12) kontroliuoja Z-mikropozicionieriaus (7) ir mikroskenerio (8) koordinates ir perduoda atitinkamų koordinatės jutiklių duomenis į duomenų registracijos ir apdorojimo įtaisą (13). Sukimo variklio valdiklis (14) generuoja elektrinį signalą, kuris kontroliuoja sukimosi variklio (9) sukimąsi.

Siekiant suformuoti tiriamos paviršiaus savybės vaizdą, signalai, atitinkantys zondo (1) sąveiką su bandinio (2) paviršiumi ir kampinę sukimo variklio (9) padėtį (azimuto koordinatę), kurie yra generuojami zondo detekcijos jutiklio (4) ir sukimosi jutiklio (10), yra nuskaityti sinchronizuotai ir tuo pat metu. Tuo būdu, kiekvienai paviršiaus savybės duomenų vertei yra gaunama atitinkanti azimuto koordinatės vertė. Signalas, nusakantis radialinę zondo (1) koordinatę bandinio (2) atžvilgiu, gaunamas jungiant nanoskenerio (6) ir mikroskenerio (8) signalus, arba iš išorinės sistemos, pvz., lazerinio interferometro, gali būti registruojamas tokiu pat būdu, arba mažesniu registracijos greičiu, vėliau interpoliuojant. Šie signalai apdorojami duomenų registracijos ir apdorojimo įtaiso (13), gaunant radialinės koordinatės R , sukimo variklio (9) centro atžvilgiu ir sukimo variklio (9) kampinės padėties (azimuto koordinatės), θ , vertes.

4 pav. yra parodyti signalų laikinių priklausomybių pavyzdžiai (iš viršaus

žemyn): zondo detekcijos jutiklio (4), nanoskenerio (6), sukimosi jutiklio (10) ir apdoroto signalo, atitinkančio azimuto koordinatę Θ , kurie yra registruojami sukimo variklio (9) dviejų apsisukimų metu. Gautos radialinės koordinatės R ir azimuto koordinatės Θ vertės, duomenų registracijos ir apdorojimo įtaiso (13) yra panaudojamos apskaičiuoti koordinatės, Dekarto koordinatės sistemoje, pagal lygtis:

$$X = R \cdot \cos(\Theta), Y = R \cdot \sin(\Theta).$$

Po to šios koordinatės panaudojamos zondo-paviršiaus sąveikos vertei, išreikštai spalviniu kodu, patalpinti tam tikroje plokštumos tinklelio pozicijoje, tuo būdu sukuriant tiriamos paviršiaus savybės vaizdą, kuris gali būti atvaizduotas įvesties ir vaizdavimo įtaiso (15) pagalba. 5 pav. yra parodytas šiuo būdu suformuotas vaizdas, gautas skenuojant kalibravimo gardelę, turinčią nominalų 21nm aukštį, naudojant AJM jutiklį kaip zondą (1).

Didėjant radialiniam atstumui nuo sukimosi centro, jei kampinis greitis ω ir duomenų registracijos sparta SR lieka pastovūs, linijinis zondo (1) greitis bandinio (2) atžvilgiu didėja, kaip ir vertė $\Delta\Theta$, išreiškianti azimuto koordinatės skyrą (2 pav.). Tai lemia didėjantį erdvinį atstumą tarp zondo detekcijos jutiklio (4) registruojamų verčių. Siekiant sumažinti šį nepageidaujamą efektą, proceso metu turi būti valdomi arba registracijos sparta SR , arba kampinis greitis ω . Čia pateiktame rekomenduojamame įgyvendinime naudojamas būdas, skirtas valdyti kampinį greitį ω , įvedant pageidaujamą linijinio greičio diapazoną ir apskaičiuojant atitinkamą ω . Didėjant radialinei koordinatei R , sukimo variklio valdiklis (14) generuoja sukimo variklio valdymo signalą, kuriuo nustatomas pageidaujamas ω . Operatorius gali parinkti pageidaujamas linijinio greičio diapazoną ir ω atnaujinimo dažnį.

Tarpas tarp zondo ir paviršiaus turėtų būti suprantamas kaip atstumas tarp zondo laikiklio (3) ir bandinio (2) paviršiaus. Skenuojant zondą (1) bandinio (2) paviršiumi tarpas tarp zondo (1) ir paviršiaus (2) ženkliai kinta, dėl esančio tarp jų polinkio kampo. Įprastinio lėto skenavimo metu, šis polinkis kompensuojamas grįžtamojo ryšio grandine, kuri seka zondo detekcijos signalą ir generuoja valdymo signalą, skirtą Z-nanopozicionieriaus (5) padėčiai pakeisti, kad zondo detekcijos signalas būtų palaikomas pastoviu. Registruotuose duomenyse šis polinkis pasireiškia kaip, pvz., lėtas kitimas aukščio, rasto iš zondo-paviršiaus sąveikos jutiklio (4) generuoto signalo, palyginti su faktiniu aukščiu „plokščiam“ paviršiui, ir gali būti

kompensuojamas apskaičiuojant ir atimant atitinkamą plokštumą iš jutiklio duomenų. Esant dideliems skenavimo greičiams (centimetrai per sekundę), bandinio aukščio kitimas gali būti per greitas, kad galėtų būti kompensuojamas PID-grįžtamojo ryšio sistema, įprastai naudojamu SZM, ir galima tik vidutinė aukščio kompensacija. Jei ši vidutinė kompensacija pritaikoma su ženkliu vėlinimu, kuriuo pasižymi PID-tipo valdymas, gali pasireikšti bent du nepageidaujami efektai: pirma, prastas sąveikos stiprumo valdymas, dėl kurio gali būti pažeistas zondas arba paviršius, arba per mažas sąveikos stiprumas, dėl kurio gali būti prarastas kontaktas su paviršiumi ir informacija apie paviršių; antra, zondo detekcijos jutiklis atsidurtų mažesnio jautrumo diapazone, arba apskritai už jo ribų. Siekiant išvengti šios problemos, žemiau atskleidžiamas būdas, naudojantis kaip įvesties duomenis zondo detekcijos jutiklio (4) duomenis ir sukimo variklio sukimosi duomenis iš sukimo variklio valdiklio (14) arba sukimosi jutiklio (10), ir išėjime formuojantis valdymo signalą, kurio dėka polinkio sąlygotas tarpo atstumo kitimas kompensuojamas su nereikšmingu vėlinimu.

Jei sukimo variklis (9) sukasi pastoviu kampiniu greičiu ω , polinkio sąlygotas atstumo tarp zondo ir paviršiaus kitimas zondo-paviršiaus sąveikos signale, gaunamame iš zondo detekcijos jutiklio (4) matysis kaip periodinis signalas, turintis eilę dažnio $k \cdot \omega$ harmonikų, kur $k = 0, 1, 2, \dots, N$, ir $N \cdot \omega$ – Nyquist dažnis. Čia atskleidžiamas tokio atstumo kitimo kompensacijos algoritmas aprašomas tiesine laiko-invariantine sistema. Įvesties signalas, atitinkantis zondo-paviršiaus sąveiką, paduodamas į tiesinį laiko-invariantinį valdiklį, ir išvesties signalas suskaičiuojamas realiu laiku ir panaudojamas valdyti Z-ašies nanopozicionieriaus (5) poziciją, valdančią atstumą tarp zondo (1) ir bandinio (2). Šis valdiklis aprašomas sekančia perdavimo funkcija:

$$C(s) = \frac{U(s)}{X(s)} = -2\gamma \left(\frac{\alpha s + \beta \omega}{s^2 + \omega^2} \right) \left[1 + \frac{\alpha}{s} + 2 \sum_{m=2}^n \frac{\alpha s + \beta \omega}{s^2 + m^2 \omega^2} \right]^{-1}.$$

Čia $X(s)$ yra valdiklio įvesties signalo Laplaso transformacija, $U(s)$ – valdiklio išvesties signalo Laplaso transformacija. Skaičius n išreiškia skaičių harmoninių osciliatorių, į kuriuos atsižvelgia valdiklis, taigi kuo didesnis n , tuo didesnis skaičius įvesties signalo Furje harmonikų, į kuriuos atsižvelgia valdiklis. Verta paminėti, kad didelės n vertės reikalauja didelių skaičiavimo išteklių, kad veiktų realiu laiku. Valdiklis turi tris parametrus, α , β , ir γ , kurie yra randami eksperimentinio derinimo būdu

konkrečiai valdomai sistemai. Parametras γ yra susijęs su zondo-paviršiaus sąveikos jutiklio jautrumu, ir gali būti teigiamas arba neigiamas. Parametrai α ir β nusako valdiklio stabilumą, todėl turėtų būti parenkami iš stabilumo regiono. Ribiniu atveju $n \rightarrow +\infty$, stabilumo regionas nusakomas sekančiomis nelygybėmis: $\alpha > 0$ ir $\beta/\omega > -1/4$.

Aukščiau aprašyta valdiklio perdavimo funkcija gali būti pavaizduota kaip blokinė diagrama, parodyta 6 pav. Valdiklio įvesties signalas – laikinė priklausomybė $x(t)$, išvesties signalas – $u(t)$, filtruotas įvesties signalas $y(t)$ ir vidiniai signalai, generuojami harmoninių osciliatorių rinkinio $a_0(t)$, $a_1(t)$, $a_2(t)$, ..., $a_n(t)$. Filtruotas įvesties signalas $y(t)$ paduodamas į harmoninio osciliatoriaus perdavimo funkciją, žymimą $H_m(s)$. Vidinė harmoninio osciliatoriaus perdavimo funkcija $H_m(s)$, kai $m=1, 2, \dots, n$, yra parodyta Pav. 7. Valdiklio parametrai α ir β reguliuoja įfiltruoto įvesties signalo sąveiką su harmoniniu osciliatoriumi; i – menamas vienetas $i = \sqrt{-1}$.

Nulinės eilės harmoninio osciliatoriaus perdavimo funkcijos $H_0(s)$ vidinė struktūra parodyta 8 pav.

Aprašytas atstumo kitimo kompensacijos algoritmas turėtų veikti realiu laiku, taigi nors įmanoma šį algoritmą realizuoti pagrindiniame duomenų registracijos ir apdorojimo įtaise (13), sėkmingam veikimui rekomenduojama jį realizuoti dedikuotame įtaise, pvz., specialiai sukurtame integruotame grandyne, ar elektroninėje plokštėje mikrovaldiklio (MCU), ar lauku programuojamo tranzistorių masyvo (FPGA) pagrindu – atstumo kitimo kompensacijos valdiklyje (19). Valdymo signalas, generuojamas valdiklio (19) paduodamas į nanopozicionavimo valdiklį (11), taip reguliuojant Z-ašies nanopozicionieriaus poziciją, tokiu būdu kompensuojant polinkio sąlygotą atstumo tarp zondo (1) ir bandinio (2) kitimą.

Čia aprašytos realizacijos yra skirtos aprašyti priemonės našiam, aukštos skyros, didelio ploto SZM paviršiaus vaizdinimui taikant skenavimo aparatą, ir būdus, leidžiančius skenuoti paviršių dešimčių milimetrų per sekundę greičiu ir tinkamiems didelių matmenų bandiniams.

Nors šiame išradimo aprašyme buvo pateikta daug savybių ir privalumų kartu su struktūriniais komponentais, šis aprašymas pateikiamas kaip išradimo realizacijos pavyzdys. Nenutolstant nuo išradimo principų, gali būti konkrečių komponentų pokyčių, ypač formoje, matmenyse ir išdėstyme, kurie atitinka plačiai suprantamas apibrėžtyje panaudotų koncepcijų ir apibrėžimų prasmes.

LITERATŪROS ŠALTINIAI:

1. L. M. Picco et al., "Breaking the Speed Limit with Atomic Force Microscopy," *Nanotechnology* 18, no. 4 (2007): 044030, <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/4/044030>)
2. P. Klapetek et al., "Large Area High-Speed Metrology SPM System," *Nanotechnology* 26, no. 6 (February 13, 2015): 065501, <https://doi.org/10.1088/0957-5448/26/6/065501>.
3. I. A. Mahmood and S. O. Reza Moheimani, "Making a Commercial Atomic Force Microscope More Accurate and Faster Using Positive Position Feedback Control," *Review of Scientific Instruments* 80, no. 6 (June 2009): 063705–8, <https://doi.org/10.1063/1.3155790>.
4. Wei Gao et al., "Surface Profile Measurement of a Sinusoidal Grid Using an Atomic Force Microscope on a Diamond Turning Machine," *Precision Engineering* 31, no. 3 (July 1, 2007): 304–9, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.01.003>;
5. Y. Cui et al., "An AFM System with Multi-Mode Scanning for Large-Area Measurement," in *5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Design, Manufacturing, and Testing of Micro- and Nano-Optical Devices and Systems*, vol. 7657 (SPIE, 2010), 382–87, <https://doi.org/10.1117/12.865476>.
6. A. Ulčinas and Š. Vaitekoniš. "Rotational Scanning Atomic Force Microscopy." *Nanotechnology* 28, no. 10 (February 2017): 10LT02

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Didelio ploto, našus skenuojančio zondo mikroskopo sukamojo skenavimo būdas, kuriame zondas skenuoja bandinio paviršių bandinio plokštumoje, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad bandinio (2) skenavimas zonu (1) vykdomas tiesiškai pozicionuojant zondą (1) bandinio (2) atžvilgiu nanoskenerio (6) aktuatoriaus pagalba nanometrų skyra XY ašimis ir mikroskeneriu (8) mikrometrų lygmens skyra XY ašimis, ir sukant bandinį (2) XY plokštumoje sukimo variklio (9) pagalba, taip kad bandinio (2) paviršius skenuojamas eile koncentrinų ar perstumtų persiklojančių žiedų (18), kur nanometrų skyros koncentrinės (16) ar spiralinės (17) trajektorijos su laisvai parenkamu žingsniu tarp žiedų (18) yra generuojamos nanoskeneriu (6), o pozicionavimas tarp žiedų – mikroskeneriu (8).

2. Būdas pagal 1 punktą, kuriame būdas papildomai apima minėtu zonu (1) diskretiškai registruojamų bandinio (2) paviršiaus savybių verčių tankio vienodumo pagerinimą skenavimo proceso metu, kurio metu registruojami zondo signalas, kampinės koordinatės signalas ir radialinės koordinatės signalas, kur vienodumo pagerinamas apima šiuos žingsnius:

- parenkamas zondo (1) skenavimo bandinio (2) atžvilgiu optimalus linijinio skenavimo greitis;
- registruojama zondo (1) radialinė koordinatė sukimosi centro atžvilgiu;
- apskaičiuojama zondo (1) numatoma radialinė koordinatė sukimosi centro atžvilgiu;
- apskaičiuojamas zondo (1) atitinkamas kampinis greitis bandinio (2) atžvilgiu;
- nustatomas apskaičiuotas pageidautinas bandinio (2) sukimosi zondo (1) atžvilgiu dažnis.

3. Būdas pagal 1 arba 2 punktą, papildomai apima atstumo tarp zondo laikiklio (3) ir bandinio (2) paviršiaus kitimo sumažinimą, atsirandančio dėl polinkio kampo tarp bandinio (2) ir minėto zondo (1) laikiklio, apskaičiuojant nanopozicionavimo valdiklio

(11) valdymo signalą atstumo kitimo kompensavimo valdiklio (19) pagalba pagal perdavimo funkciją, realizuojančią baigtinę seką harmoninių osciliatorių, kurių dažniai yra kartotiniai bandinio (2) sukimosi dažniai, ir panaudojant minėtą valdymo signalą reguliuoti atstumą tarp minėto zondo laikiklio (3) ir bandinio (2) Z-ašies nanopozicionieriaus (5) pagalba,

kur informacija apie bandinio (2) sukimosi dažnį minėto zondo (1) pagalba ir signalas, atitinkantis atstumą tarp minėto zondo (1) ir bandinio (2), panaudojami kaip įvesties duomenys, valdikliui (19) apskaičiuoti Z-ašies nanopozicionieriaus valdymo signalą.

4. Būdas pagal bet kurį ankstesnį punktą, papildomai apima bandinio (2) savybės, detektuojamos minėto zondo (1) pagalba, erdvinio pasiskirstymo atvaizdavimo generavimą, kur atvaizdavimas generuojamas atliekant sekančius žingsnius:

- sinchroniškas ir vienalaikis registravimas bent pirmojo zondo (1) signalo, atitinkančio detektuojamą bandinio (2) savybę, antrojo signalo, atitinkančio besisukančio bandinio (2) zondo (1) atžvilgiu kampinę koordinatę, ir trečiojo signalo, atitinkančio zondo (1) radialinę koordinatę bandinio (2) atžvilgiu esmingai lygiagrečia bandinio (2) plokštumai kryptimi;

- apskaičiavimas kampinės koordinatės ir radialinio poslinkio nuo sukimosi ašies, kur kampinė koordinatė yra azimuto koordinatė, radialinis poslinkis nuo sukimosi ašies yra radialinė koordinatė;

- azimuto koordinatės ir radialinės koordinatės pervedimas į Dekarto koordinates pagal lygtis

$$X = R \cdot \cos(\Theta), Y = R \cdot \sin(\Theta),$$

- apskaičiavimas padėties vaizde, kuriai priskiriama atitinkama paviršiaus savybės signalo vertė.

5. Skenuojančio zondo mikroskopas, skirtas naudoti būde pagal bet kurį ankstesnį punktą, skenuojančio zondo mikroskopas apima

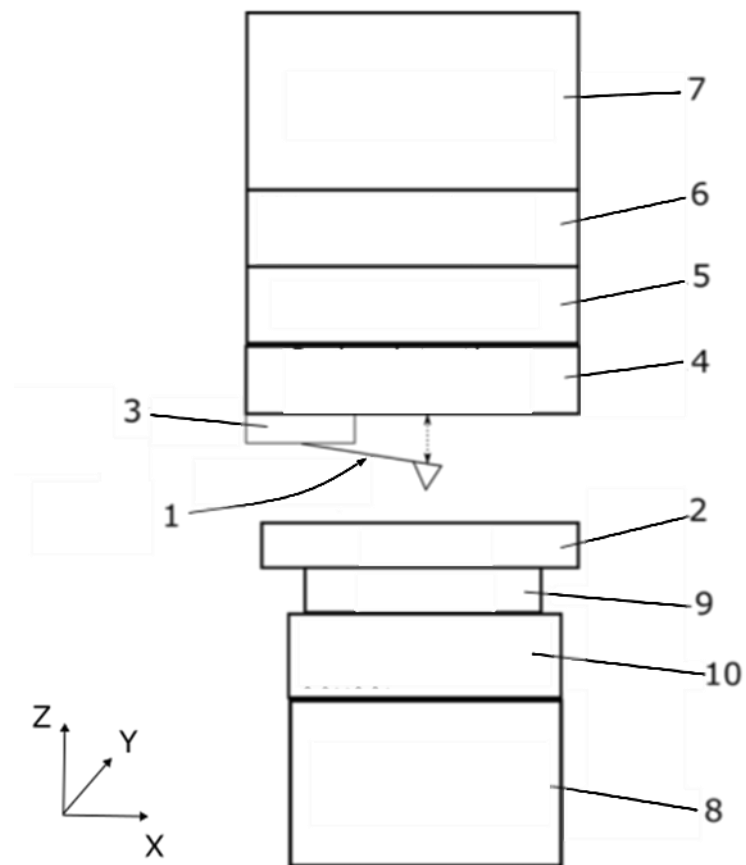
- zondą (1), jautrų bandinio (2) paviršiaus savybei;
- zondo laikiklį (3);
- zondo detekcijos jutiklį (4), skirtą detekcijai minėto zondo (1) signalo, atitinkančio minėtą paviršiaus savybę;
- sukimo variklį (9), skirtą bandiniui (2) sukti minėto zondo (1) atžvilgiu tam tikru kampiniu greičiu;
- sukimosi jutiklį (10), skirtą bandinio (2) kampinei koordinatei zondo (1) atžvilgiu nustatyti;
- nanoskenerį (6) ir mikroskenerį (8) zondo (1) tiesiniam pozicionavimui bandinio (2) atžvilgiu kryptimi, iš esmės lygiagrečia bandinio plokštumai;
- priemones (11, 12) nustatyti nanoskenerio (6) ir mikroskenerio (8) koordinates; alternatyviai gaunamas išorinės sistemos, tokios kaip lazerinis interferometras, pagalba;
- priemones (1, 4, 10, 13) sinchronizuotam ir vienalaikiam registravimui signalų, atitinkančių minėtą paviršiaus savybę, bandinio (2) kampinę koordinatę zondo atžvilgiu ir tiesinę koordinatę kryptimi, iš esmės lygiagrečia bandinio plokštumai.

6. Skenuojančio zondo mikroskopas pagal 5 punktą, kur nanoskeneris (6) turi bent nanometrų skalės skiriamąją gebą, o mikroskeneris (8) turi bent mikrometro skalės skiriamąją gebą ir iš esmės didesnę judėjimo diapazoną nei nanoskeneris (6).

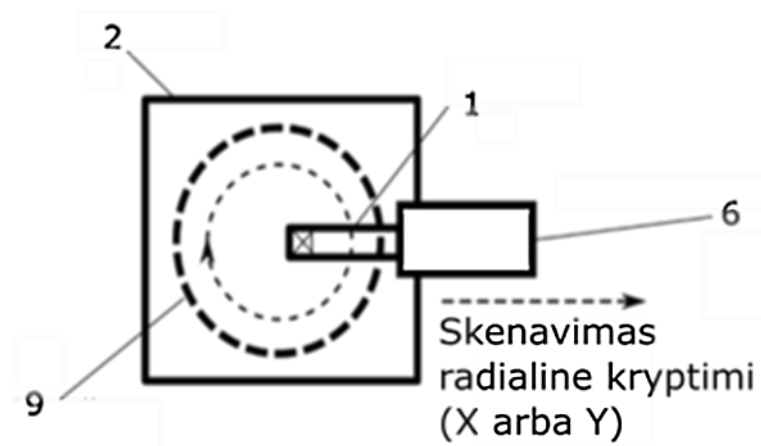
7. Skenuojančio zondo mikroskopas pagal 5 arba 6 punktą, kur skenuojančio zondo mikroskopas apima:

- aparatą (4), skirtą generuoti signalą, atitinkantį atstumui tarp minėto zondo laikiklio (3) ir bandinio (2) paviršiaus;
- aparatą (5), skirtą pozicionuoti minėtą zondą (1) bandinio (2) atžvilgiu kryptimi, iš esmės statmena bandinio (2) plokštumai, sukonfigūruotą priimti valdymo signalus;
- priemones (4, 13, 19) duomenų registracijai ir apdorojimui, skirtas įvesti signalą, atitinkantį atstumą tarp minėto zondo laikiklio (3) ir bandinio (2) paviršiaus,

apskaičiuoti valdymo signalą ir išvesti minėtą valdymo signalą į Z-ašies nanopozicionierių (5) ir Z-ašies mikropozicionierių (7), taip pozicionuojant zondą (1) bandinio (2) atžvilgiu kryptimi, esmingai statmena bandinio (2) paviršiui.

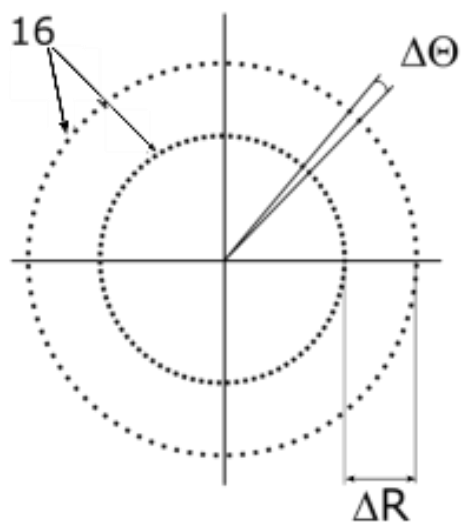


a)

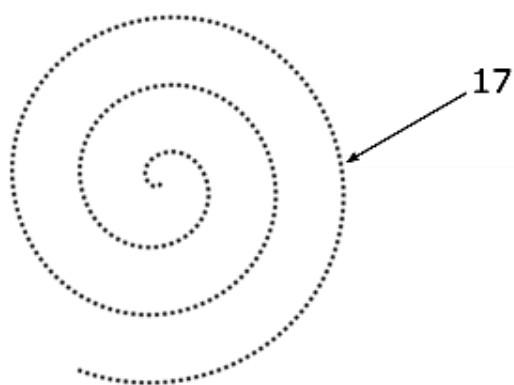


b)

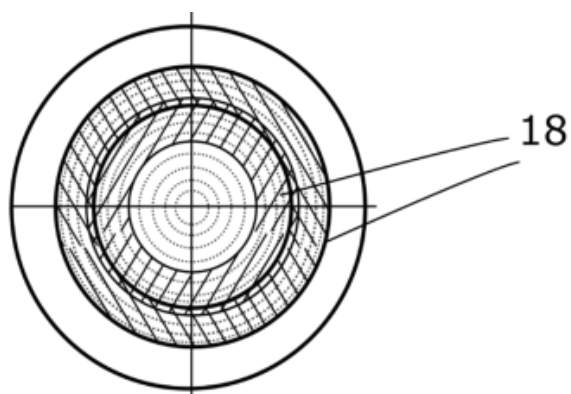
1 pav.



a)

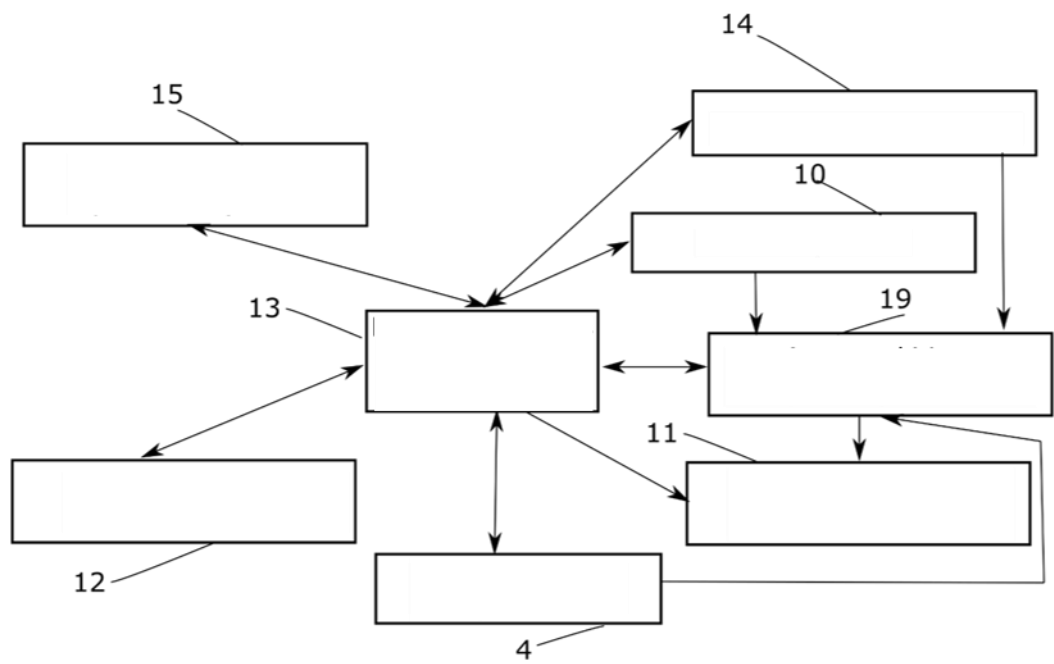


b)

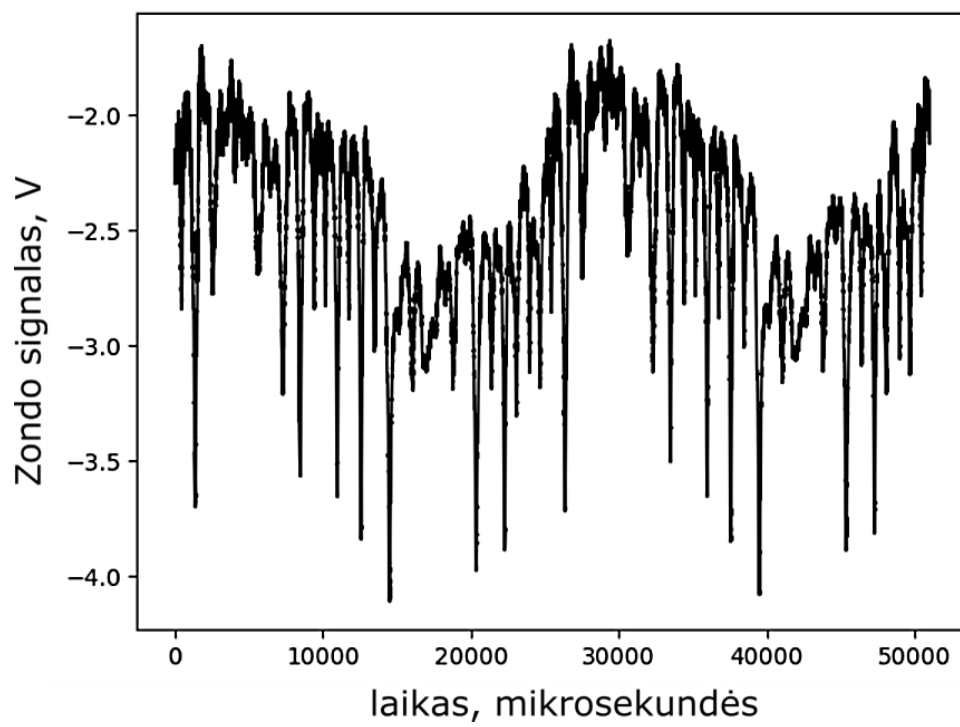


c)

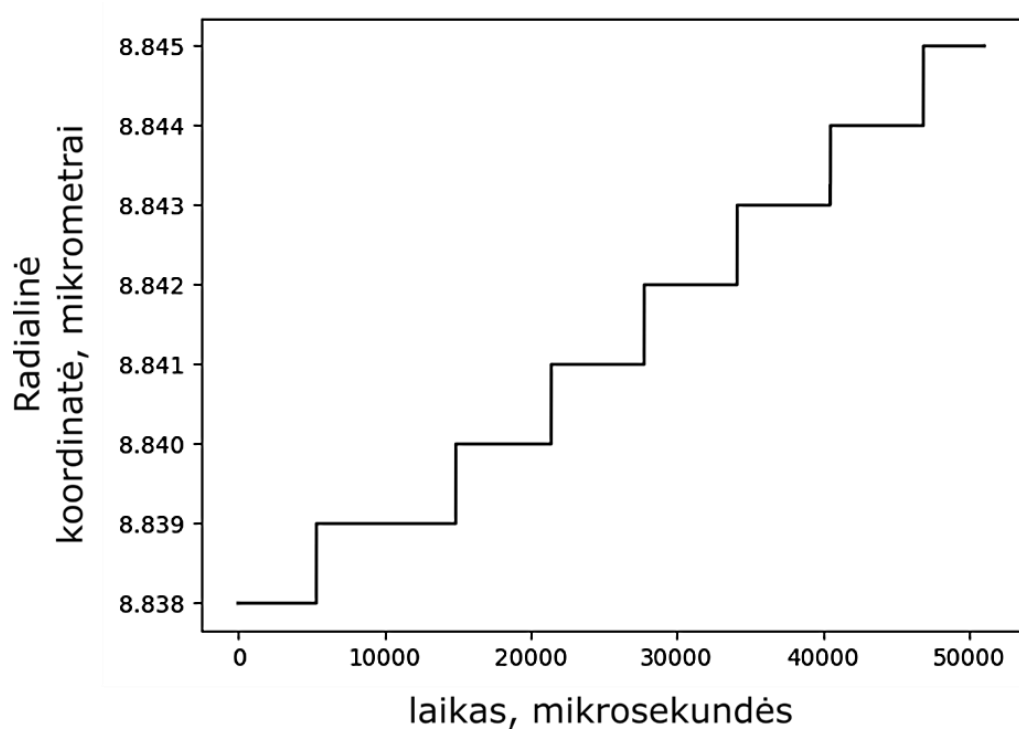
2 pav.



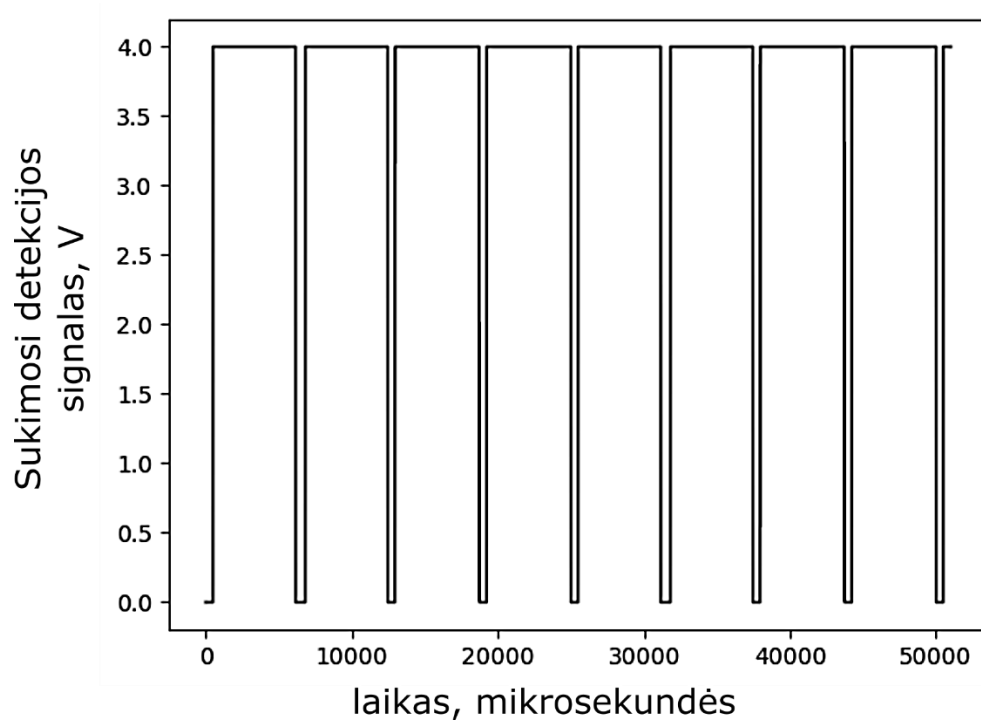
3 pav.



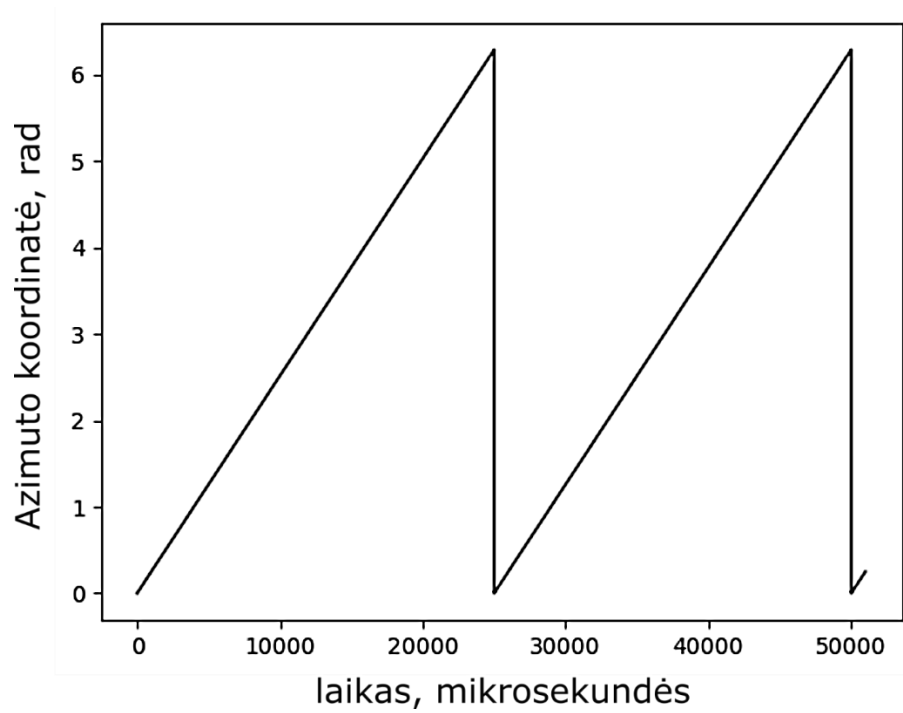
a)



b)

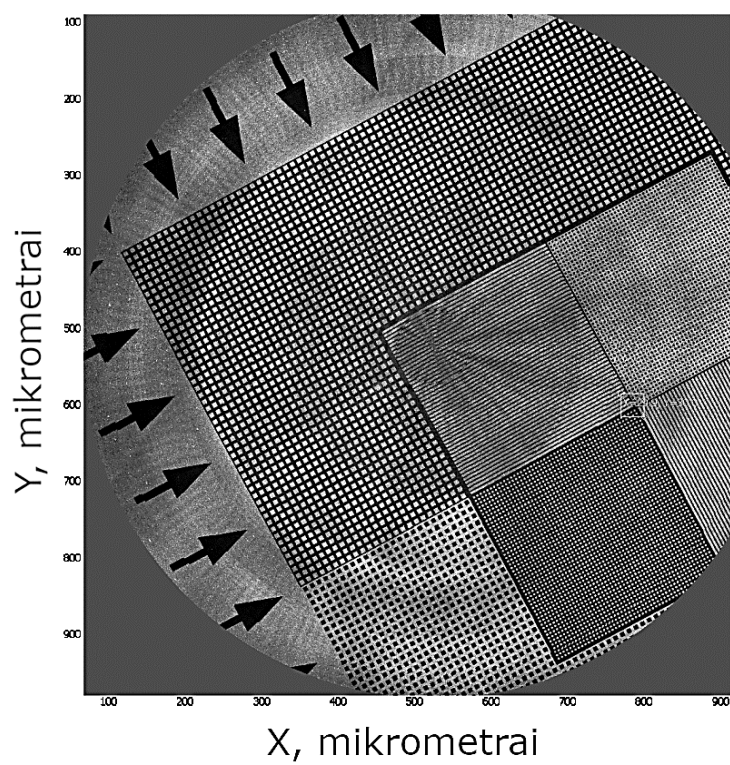


c)

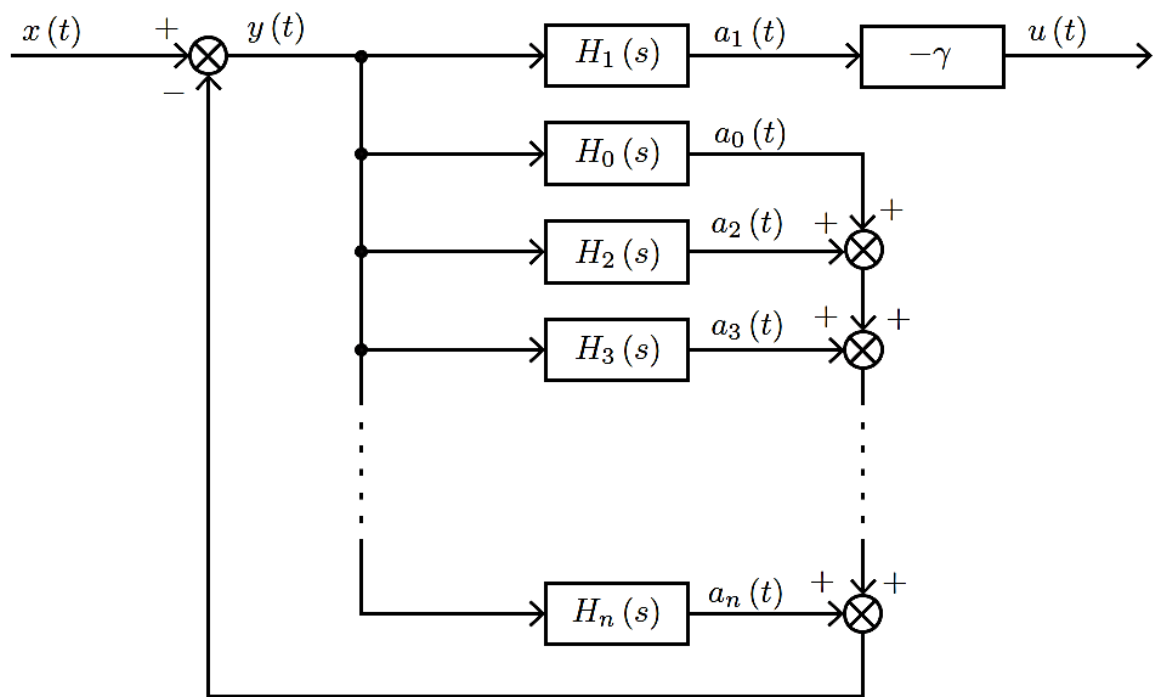


d)

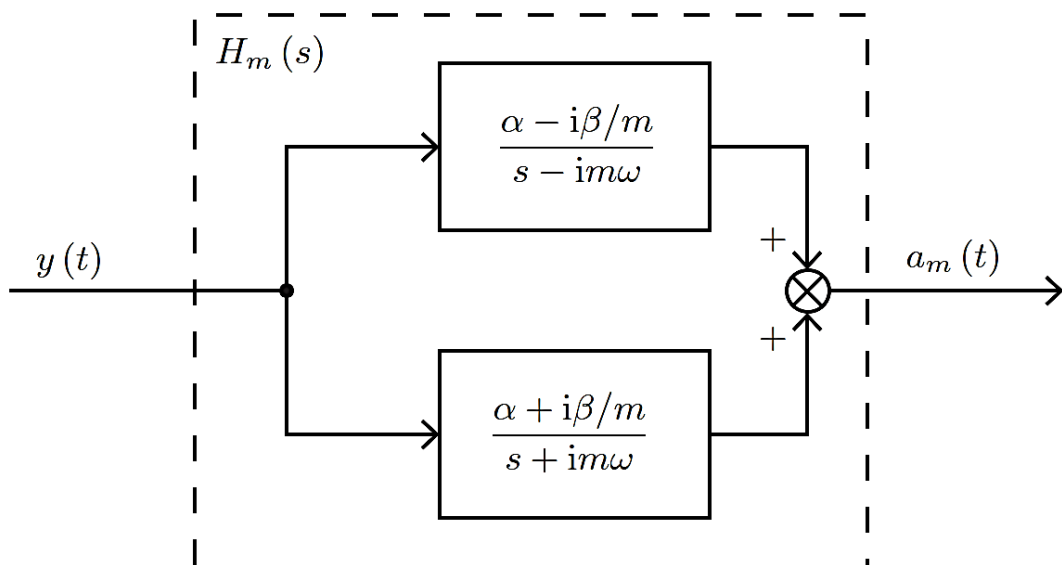
4 pav.



5 pav.



6 pav.



7 pav.

