

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2021 572**
(22) Paraiškos padavimo data: **2021-11-26**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2023-06-12**
(45) Patento paskelbimo data: **2023-07-10**

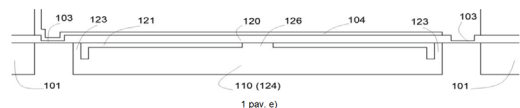
(73) Patento savininkas:
KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS, K. Donelaičio g. 73, 44029 Kaunas, LT
(72) Išradėjas:
Darius VIRŽONIS, LT
Gailius VANAGAS, LT
Mindaugas DZIKARAS, LT
Dovydas BARAUSKAS, LT
Donatas PELENIS, LT
Marius MIKOLAJŪNAS, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Otilija KLIMAITIENĖ, 35, AAA Law, A. Goštauto g. 40B, Verslo centras „Dvyniai“, LT-03163 Vilnius, LT

LT 7005 B

(54) Pavadinimas:
Elektrostatškai žadinamas hermetiškas daugelio celių mikroelektromechaninis vykdiklis ir jo gamybos būdas

(57) Referatas:

Šis išradimas atskleidžia perimetru įtvirtinto elektrostatškai žadinamo mikroelektromechaninio vykdiklio konstrukciją ir gamybos būdą. Vykdiklio struktūra apima aibę elektrostatinių-talpinių celių, kurios, elektrostatškai žadinamos, sukuria lokalius sukimo momentus. Perimetru įtvirtinta ir žadinama celių struktūra deformuojasi įvairiais būdais vertikalia kryptimi kelių ar dešimčių mikrometrų intervale, taip leisdamas atlikti AJM jutiklio ar mikrosrautų valdymo funkcijas. Perimetru įtvirtintos struktūros privalumas yra didesni darbiniai dažniai bei didesnės išėjimo energijos. Taip pat, ji yra natūraliai hermetiška, todėl mažiau jautri užterštumui bei mažiau slopinama, vykdkliui dirbant skysčiuose. Visi išradimo įgyvendinimo variantai pagaminami naudojant su CMOS procesais suderinamą MEMS mikromontavimo technologiją, kuri paremta plokštelių sujungimo ir giluminio mikromontavimo procesais.



IŠRADIMO SRITIS

Išradimas atskleidžia elektrostatiškai žadinamo mikroelektromechaninio vykdiklio konstrukciją ir gamybos būdą. Perimetru hermetiškai įtvirtinta vykdiklio struktūra apima aibę nesimetrinių elektrostatiinių-talpinių hermetiškų celių, kurios, elektrostatiškai žadinamos, sukuria sukimo momentą vykdiklio pagrindo atžvilgiu, įvairiai ir efektyviai deformuodamos jį vertikalia kryptimi. Vykdiklis naudojamas atlikti atominių jėgų mikroskopijos (AJM) jutiklio ir mikrosrautų valdiklio funkcijas.

TECHNIKOS LYGIS

Viena šio išradimo taikymo sričių, atominių jėgų mikroskopija (AJM), yra skenuojančio zondo mikroskopijos (angl. „scanning probe microscopy“ arba SPM) poklasė. Skenuojančio zondo mikroskopijos paskirtis yra tiriamojo objekto trimačio nanodimensinio vaizdo gavimas. AJM uždavinių specifika yra tarpatominių jėgų, veikiančių kaip atstumo tarp tiriamojo bandinio ir jutiklio funkcija, registravimas bei matavimas.

Klasikinį AJM jutiklio mechaninę dalį sudaro gembės pavidalo jautrusis elementas, kurio laisvajame gale yra iki nanometrinių matmenų nusmailintas liestukas, o įtvirtintasis galas yra žadinamas susietos elektromechaninės sistemos. Gembės laisvojo galo poslinkis yra registruojamas optiniu jutikliu (pavyzdžiui, patente US4724318A, IBM). Tačiau, šis klasikinis AJM jutiklis turi didelius našumo apribojimus dėl sąlyginai žemo žadinimo dažnio, optinio nuskaitymo vėlinimo bei nuoseklaus vaizdo taškų gavimo būdo. Siekdami didinti AJM našumą, straipsnio [1,2] autoriai pasiūlė vaizdo formavimui panaudoti keletą ar kelias dešimtis lygiagrečiai veikiančių AJM kanalų. Lygiagretaus veikimo AJM tyrimai suteikė keletą galimybių pademonstruoti gembių masyvais grindžiamus AJM jutiklius [4, 5, 10]. Tačiau tai sumažino AJM skyrą ir sukūrė naujo pobūdžio našumo apribojimus, susijusius su techninėmis problemomis apdorojant didelį kiekį lygiagretaus veikimo duomenų.

Pastaraisiais metais pademonstruota gembių nenaudojančio AJM jutiklio koncepcija, grindžiama trimačio nanospausdinimo būdu pagamintu liestukų masyvu [7], poslinkius registruojant paskirstyto optinio sverto principu [3]. Šis įtaisas pademonstravo 1000 individualių jutiklių, veikiančių 0,5 mm apertūroje, lygiagretų veikimą. Vis dėlto, gauta skyra labai atsilieka nuo šiuolaikinių AJM galimybių. Kitas

AJM našumo didinimo būdas yra žadinimo dažnio didinimas. Siekiant padidinti žadinimo dažnį, pasiūlyta į AJM jutiklio gembę integruoti talpinius mikromontuojamus ultragarso keitiklius (CMUT). Buvo pademonstruotas gembės elementas ore veikiantis 1,76 MHz dažniu, tačiau pamatuotas tik jo radiacinis slėgis, be AJM veikimo [6]. Po kelių metų buvo sukurtas ir pademonstruotas kombinuotas AJM jutiklis, klasikiniame AJM gembės tipo jutiklyje turintis CMUT elementą su nanometriniu liestuku [11], (US7395698B2, WO2008052065A2, Georgia Tech Research Corp). Šiame įtaise (FIRAT) buvo naudojamas elektrostatiškai žadinamas ir optiškai nuskaitomas CMUT ar mikrotiltelio elementas su nanometrinių matmenų liestuku centre. Ši mikrostruktūra buvo integruota įprastinių matmenų AJM gembės laisvajame gale ir leido žymiai viršyti žinomų įtaisų našumo ir dinaminio jautrio technines galimybes. Taip pat, įtaisais buvo galima kiekybiškai įvertinti tarpatomines jėgas. Vis dėlto, FIRAT struktūra buvo pernelyg sudėtinga, jos gamyba brangi, o AJM veikimo vertikalus (z-ašies kryptimi) ruožas liko apribotas CMUT struktūros vakuuminio tarpelio dydžiu. Taip pat, šiame jutiklyje buvo neįmanoma išspręsti prieštaravimų tarp liestuko, integruoto ant CMUT membranos, masės ir poreikio didinti viso įtaiso jautrį bei dinaminį darbo ruožą vertikalios ašies kryptimi.

Dar vienas AJM jutiklio, žadinamo elektrostatiškai būdu, patobulinimas buvo atskleistas JAV patente US7797757B2 (Georgia Tech Research Corp). Pagrindinis išradimo motyvas buvo našumo apribojimas dėl iki tol naudoto išorinio gembės žadinimo principo. Išradime aprašoma eilė elektrostatinio žadinimo realizacijų, kurios bent iš dalies sprendžia elektrostatiniais įtaisais būdingą vertikalios ašies apribojimo problemą. Tikrasis vertikaliosios ašies ruožas čia priklauso ne tik nuo elektrostatinio įtaiso tarpelio dydžio, bet ir nuo gembės elemento ilgio. Vis dėlto, prisirišant prie gembės struktūros, praktiškai galima dirbti tik rezonansiniu režimu, nes statiniai režimai dideliuose z-ašies ruožuose yra susiję su didelėmis darbo įtampomis ir patekimo į gerai žinomą pritraukimo (kolapso) režimą rizika. Taip pat, patente pasiūlyti sprendimai buvo susiję su optiniu jutiklio poslinkio nuskaitymu, gembės turėjo būti gaminamos iš skaidrios medžiagos, kas didino jutiklio sudėtingumą ir kainą.

Neseniai sukurtas naujas elektrostatinis vykdyklių tipas, kuriame elektrostatinė jėga, sukelianti tempiančius ar gniuždančius įtempius skersine kryptimi, buvo panaudota įvairių struktūrų deformacijai (atskleista JAV patente US9164277B2,

Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung eV) [12]. Išradimas atskleidžia, kaip skersiniai įtempiai panaudojami sukelti įvairių mikrostruktūrų (mikrogembių, mikrotiltelių ir mikromembranų) lenkimo jėgas. Šis išradimas yra reikšmingas žingsnis mikroelektrostatinių įtaisų srityje, leidžiantis konstrukciškai atsieti elektrostatinio tarpelio sukeliamus apribojimus nuo vertikaliosios ašies darbo ruožo.

Pažymėtina, kad aptarti AJM jutiklius tobulinantys ir elektrostatinį žadinimą naudojančios techniniai sprendimai yra giminingi Stanford university 1998 metų patente US5982709 atskleistai talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių (CMUT) konstrukcijai ir gamybos technologijai. Šis keitiklis apima pasirinkto dydžio ir formos membranas, palaikomas jų kraštuose atramomis, kur daug membranų yra išdėstytos viena šalia kitos, pirmasis elektrodas yra membranų tvirtinimo pagrindas, o antrasis elektrodas yra membranų paviršius dengiantis plonas laidininko sluoksnis. Membranų atramos sudaro ertmes po membranomis bei kanalus tarp šių ertmių, todėl membranų celės viena kitos atžvilgiu nėra hermetiškos.

Tačiau, tiek minėtame Fraunhofer Gesellschaft US9164277B2 išradime, tiek daugelyje kitų žinomų konstrukcijų, AJM jutikliams ar kitos paskirties elektrostatiskai žadinamoms mikroelektromechaninėms struktūroms, pasižyminčioms sąlyginai didele (didesne už 1 μm) eiga, nebuvo naudoti visu perimetru įtvirtinti deformuojami elementai, kas būtų privalumas, siekiant didesnių darbo dažnių bei didesnių jutiklio darbo energijų, susijusių su didesniu deformuojamų elementų ekvivalentiniu standumu.

Taip pat, perimetrinis deformuojamų elementų tvirtinimas turi natūralias hermetiškumo galimybes, todėl juo grindžiamos struktūros yra mažiau jautrios užterštumui bei mažiau slopinamos, pavyzdžiui, AJM jutikliui dirbant skysčiuose. Taip pat hermetiškumas yra esminė vykdiklio savybė taikant juos mikrosrautų sistemose.

IŠRADIMO ESMĖ

Išradimas atskleidžia mikroelektromechaninį vykdiklį su šiomis specialiomis konstrukcinėmis savybėmis:

- elektrostatiniu būdu žadinama plokštelė ant vykdiklio stacionaraus pagrindo yra įtvirtinta hermetiškai visu savo perimetru,

- minėta plokštelė turi mikrostruktūrą, sudarytą iš daugelio nesimetrinių elektrostatiinių-talpinių celių, kurios, elektrostatiškai žadinamos, sukuria lokalius sukimo momentus šioje daugelio celių struktūroje.

Tokia perimetru įtvirtinta struktūra, elektrostatiškai žadinama, deformuojasi vertikalia kryptimi kelių ar dešimčių mikrometrų intervale, įvairiais statiniais ir dinaminiais būdais. Šios savybės leidžia ją taikyti skenuojančiojo zondo mikroskopijoje, veikiančioje statiniu ir/arba dinaminio režimu. Pavyzdžiui, viena vykdiklio panaudojimo sričių yra atominių jėgų mikroskopija (AJM), kur atskiras vykdiklis gali veikti kaip vienas AJM jutiklis, arba keletas tokių vykdiklių - kaip vienmatis ar dvimatis lygiagrečių AJM jutiklių masyvas, formuojantis trimatį nanodimensinį vaizdą. Kita šio hermetiško vykdiklio panaudojimo galimybė: skysčių srauto valdiklis mikrosrautų valdymo uždaviniuose.

Išradimas taip pat atskleidžia šios perimetru įtvirtintos plokštelės struktūros su integruotomis nesimetriškomis talpinėmis celėmis gamybos technologiją, kuri naudoja plokštelių sujungimo principą.

Minėtas mikroelektromechaninis vykdiklis pasižymi šiais techniniais efektais:

- naudojant elektrostatinį žadinimą, gaunamas platus darbo dažnių ruožas ir nedidelė rezonanso kokybė;
- AJM uždaviniuose naudojant vykdiklių-AJM jutiklių matricą, gaunamas didelis AJM skenavimo našumas ir platus regos laukas;
- perimetru įtvirtinto vykdiklio viduje galima integruoti optinę AJM jutiklio nuskaitymo sistemę; taip gaunama paprasta ir efektyvi vykdiklio elektromechaninės dalies konstrukcija bei minimali signalo nuskaitymo kokybės priklausomybė nuo aplinkos sąlygų;
- jutiklyje naudojama hermetiška perimetru įtvirtinta talpinių-elektrostatiinių celių mikrostruktūrą turinti membrana, kurios techninė priežiūra yra paprasta, ji mažiau slopinama skysčiuose, nei įprastinės AJM gembės, ji turi didesnę ekvivalentinio standumo potencialą, todėl gali veikti aukštesniais darbo dažniais.
- perimetru įtvirtinta membrana su elektrostatinėmis celėmis gali būti tiesiogiai integruojama su AJM nuskaitymo elektronika. Taip eliminuojama eilė mechaninių ir elektrinių perėjimų, kurie apriboja įprastinių AJM jutiklių naudojimą. Taip pat

tiesioginis jutiklio integravimas su elektronika sukuria didelį AJM kainos mažinimo potencialą.

- vykdiklio paviršiaus vertikalaus poslinkio (z-ašimi) intervalas nėra ribojamas elektrostatiinių celių vakuumo tarpelio dydžiu, o vykdiklio vertikalios eigos ribos gali būti plečiamos ar siaurinamos keičiant vykdiklio struktūros elementų matmenis, bet nekeičiant žadinimo įtampos.
- naudojant vykdiklį kaip AJM jutiklį, yra galimas sukamasis individualaus AJM liestuko judesys, todėl gaunamas didesnis skyros potencialas, galimi nauji AJM skenavimo režimai bei tikslesnis trimatis vaizdinimas.

BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Esminiai išradimo aspektai paaiškinti brėžiniuose ir diagramose. Brėžiniai ir diagramos yra išradimo aprašymo sudedamoji dalis ir pateikiami kaip nuoroda į galimą išradimo įgyvendinimą ar vizualų paaiškinimą, bet neturi riboti išradimo apimties. Brėžiniai yra schematiniai ir principiniai, juose pavaizduotų objektų dydžiai, proporcijos ir konkretūs realizacijos variantai gali skirtis išradimo apimtyje.

1 pav. mikroelektromechaninio vykdiklio, sudaryto iš nesimetrinių talpinių celių, struktūra:

- a) vykdiklio bazinio elemento - nesimetrinės talpinės celės vertikalus pjūvis ir
- b) vaizdas iš viršaus be celės membranos: 120 – celės membrana, 121 – vakuumo tarpelis, 122 – vertikalus tarpelis, 123 – vertikali atrama, 124 – pagrindas, 125 – apatinis elektrodas, 126 – inkarinė atrama;
- c) parodyta talpinė celė deformuotoje būsenoje veikiant Kulono jėgai – celės vertikalus pjūvis A-A ir
- d) celės vaizdas iš viršaus be membranos 120; kur membrana 120 deformuojasi išlinkdama žemyn, o vertikali atrama 123 išlinksta veikiamą deformuotos membranos 120 - tokia vertikalios atramos 123 deformacija sukuria sukimo momentą 127;
- e) parodyta vykdiklio iš mažiausiai dviejų talpinių celių konstrukcijos vertikalus pjūvis: 101 - stacionarus vykdiklio įtvirtinimo pagrindas; 103 - spyruokliniai elementai (čia, realizuoti kaip vykdiklio struktūros suploninimai įtvirtinimo perimetre); 104 – viršutinis

elektrodas, bendras abiems celėms; 110 - judrusis vykdiklio pagrindas, sutampantis su nesimetrinių talpinių celių pagrindu 124; 120 - bendra abiems celėms membrana; 121 - vakuumo tarpelis celėje; 123 - vertikali atrama; 126 – inkarinė atrama, bendra abiems celėms;

f) parodytas vykdiklis, sudarytas iš mažiausiai dviejų, centrinės įtaiso ašies atžvilgiu simetriškai išdėstytų nesimetrinių talpinių celių, esantis deformuotoje būsenoje veikiant Kulono jėgai: membrana 120 pritraukta talpinėse celėse, todėl vertikalio atramų 123 sąveikoje su membrana 120 sukurti sukimo momentai 127 į priešingas puses - veikiant šiems momentams, vykdiklio judrusis pagrindas 110 deformuojasi, sukurdamas centrinėje vykdiklio dalyje vertikalios krypties poslinkį, didesnį už vakuumo tarpelio 121 aukštį nedeformuotoje padėtyje;

g) vykdiklio konstrukcijos variantas, kuriame, didesnei vertikaliai eigai, mažesniai ekvivalentiniam elastingumui ir žemesniai darbo dažniui pasiekti, vykdiklio centrinėje dalyje sukurtas papildomas spyruoklinis elementas, šiuo atveju, įgilinimas 103“ vykdiklio pagrindo 110.

2 pav. vykdiklio pagrindu realizuotas vieno elemento AJM jutiklis:

a) AJM jutiklio vaizdas iš apačios: 100 - AJM liestukas; 101 - stacionarus konstrukcinis įtvirtinimo pagrindas; 103 - įgilinimas, atskiriantis judančią vykdiklio dalį nuo stacionaraus pagrindo; 103” – įgilinimo pertrūkiai įtaiso kampuose; 106 - apatinio elektrodo kontaktinė aikštelė; 109 - viršutinio elektrodo kontaktinė aikštelė;

b) AJM jutiklio struktūra, vertikalus pjūvis: 102 - spausdinto montažo plokštė; 104 - elektrostatinės celės viršutinis elektrodas; 105 - lydmetalio rutuliukas; 107 - spausdinto montažo laidininkai; 108 - optinės nuskaitymo sistemos elementai; 109 - kontaktinė aikštelė; 110 - judantis vykdiklio pagrindas;

c) AJM jutiklio struktūra, vertikalus pjūvis iki jutiklio simetrijos ašies, papildomai pažymėti elementai: 120 - elektrostatinio celių viršutinės plokštelės; 121 elektrostatinio celių vakuumo tarpeliai;

d) AJM jutiklio vertikalus pjūvis, kai visos celės žadinamos vienu metu;

e) AJM jutiklio elemento vertikalus pjūvis, kai vienu metu žadinama tik dalis celių ir sukuriamas nesimetrinis judančiojo pagrindo 110 įlinkis bei atitinkamas sukamasis AJM liestuko 100 judesys.

3 pav. uždavinys, kuriame vykdyklių 300 masyvas naudojamas valdyti skysčių mikrosrautą 303:

- a) žadinant masyvo vykdyklius 300 skirtingais laiko momentais, vykdomas skysčio peristaltinis pumpavimas mikrokanalu 301 pasirinkta kryptimi (pažymėta rodyklėmis - 303); 302 - mikrokanalo apačia (dugnas);
- b) mikrosrautų kanalo dalis 301 su peristaltiniu siurbliu, sudarytu iš vykdyklių 300 masyvo; peristaltinio siurblio vykdykliai 300 parodyti be juos jungiančios viršutinės spausdinto montažo plokštės;
- c) vykdyklio taikymas mikrosrautų vožtuvo funkcijai atlikti: 304 - mikrokanalo atšakos skerspjuvio plotą mažinanti pertvara; 300 - vykdyklis; 305 - pagrindinis mikrokanalas;

4 pav. AJM jutiklio elementų masyvai:

- a) vienmačio AJM jutiklio elementų masyvo pjūvis; 100 - AJM liestukai; 101 - nejudantis įtaiso pagrindas; 202 - optiškai skaidri spausdinto montažo plokštė, ant kurios surenkamas AJM jutiklio elementų masyvas; 203 - talpinės celės; 104 - viršutinis jutiklio elemento elektrodas; 105 - lydmetalo rutuliukai; 106 - kontaktinės aikštelės; 107 - laidininkai spausdinto montažo plokštėje; 208 - optinė AJM jutiklio būsenos nuskaitymo sistema, jos išvadai;
- b) išradimo taikymo uždavinys, kuriame AJM jutiklis realizuotas dvimačio vykdyklių masyvo konfigūracijoje; 200 – individualus masyvo vykdyklis; 101 – nejudantis vykdyklių pagrindas; 100 – AJM liestukai.

5 pav. vaizduoja AJM jutiklio gamybos technologiją:

- a) parengtos dvi plokštelės: 400 – monokristalinio silicio plokštelė su pomembraninėmis struktūromis 403, ir 401 – monokristalinio silicio plokštelė su izoliuoto silicio sluoksniu 402 (angl. silicon on isolator - SOI);
- b) plokštelės sujungiamos tiesioginio silicio/silicio oksido sulydymo būdu ir iš abiejų pusių suploninamos; 404 – apsauginė silicio nitrido kaukė, plonų sluoksnių nusodinimo, litografijos ir ėsdinimo metodais parengta po plokštelių sujungimo ir ploninimo;
- c) pašalinus kauke neapsaugotas plokštelės dalis, atlaisvinamos elektrostadinių celių membranos 120, o po papildomų litografijos operacijų reikiamose vietose celės atskiriamos. Kauke apsaugotos plokštelės dalys sudaro nejudantį įtaiso pagrindą

101. Po membranų atlaisvinimo, jei to reikalauja elektrinių sujungimų logika, atviras silicis gali būti papildomai oksiduojamas plonu silicio oksido sluoksniu. Elektrostatinį celių membranos 120 gali būti metalizuojamos nusodinant ir litografijos būdu apdorojant ploną metalo sluoksnį, taip suformuojant reikiamą laidininkų bei viršutinių elektrodų tinklą ir kontaktines aikšteles 109. Apatinėje įtaiso dalyje (pagal paveikslą) litografijos ir giluminio ėsdinimo metodais atskiriamas judrusis pagrindas 110, tuo pačiu suformuojant spyruoklines struktūras 103.

d) AJM liestukų 100 grupė formuojama adityvinės gamybos būdu, pavyzdžiui, 3D nanospausdinimu, dvifotonine polimerizacija ir kt. Taip pat, AJM liestukai gali būti suformuojami ant plokštelės 400 jos ploninimo metu, atitinkamai parenkant giluminio ėsdinimo metodą ir litografijos būdu formuojant reikiamas ėsdinimo kaukes.

6 pav. iliustruoja perimetru įtvirtintos AJM jutiklio elemento struktūros centrinio taško poslinkį vertikalia kryptimi, statinio žadinimo atveju. Skirtingos kreivės siejamos su skirtingais skersiniais perimetru įtvirtintos struktūros matmenimis.

DETALUS IŠRADIMO APRAŠYMAS

Vykdiklio konstrukcija ir veikimas. Išradimas apima elektrostatiu būdu žadinamą hermetiškai perimetru įtvirtintą plokštelės struktūrą, apjungiančią daugelį nesimetrinių elektrostatinį talpinių celių, suformuotų ant vieno iš plokštelės paviršių. Vykdiklio žadinimo metu sukuriama vertikalus perimetru įtvirtintos plokštelės įlinkis, atsirandantis sumuojantis daugelio nesimetrinių celių sukuriamiems lokaliems sukimo momentams. Vykdiklio bazinio elemento – elektrostatinės-talpinės celės - veikimas iliustruotas 1 paveiksle. Paveiksluose 1a-b parodyta principinė talpinės celės struktūra: a) talpinės celės skersinis pjūvis, b) celės struktūros vaizdas iš viršaus, pašalinus membraną 120. Elektrostatinės-talpinės celės svarbiausios dalys yra membrana 120, kuri visu savo perimetru mechaniškai ir hermetiškai sujungta su vertikalia atrama 123 ir inkarine atrama 126, apatinis elektrodas 125 ir vakuumo tarpelis 122. Viršutinis talpinės celės elektrodas gali sutapti su membrana 120 (jei membrana iš elektrai laidžios medžiagos) arba suformuotas membranos paviršiuje, jei membrana iš dielektrinės medžiagos. Jeigu membrana 120 pagaminta iš elektrai laidžios medžiagos, ji turi būti elektriškai izoliuota nuo ją laikančių vertikalių 123 ir inkarinės 126 atramų. Paveiksluose 1 ir 2, vienos talpinės celės mechaninis

pagrindas 124 sudaro dalį vykdiklio vientiso judančio pagrindo 110, kitaip tariant, vykdiklio judantis pagrindas 110 apima vientisai sujungtus kelių talpinių celių judančius pagrindus 124. Speciali šios celės konstrukcijos ypatybė - vakuumo tarpelis 122 turi horizontalų ir vertikalų segmentus, leidžiančius atramos 123 deformaciją su sukimo momentu 127 (parodyta 1c paveiksle). Čia parodytas skersinis talpinės celės pjūvis, kai membrana 120 pritraukta elektrostatinės jėgos. Paveiksle 1d parodyta skersinio pjūvio A-A pozicija ir talpinės celės vaizdas be membranos iš viršaus elektrostatinio pritraukimo metu. Įvykus vertikalios atramos 123 deformacijai, į celės pagrindą 124 perduodamas sukimo momentas 127, kuris deformuoja pagrindą 124 arba kitą su nesimetrine elektrostatine cele susijusį konstrukcijos elementą, kaip parodyta 2-me paveiksle. Sukimo momento 127 dydis ir kryptis, o tuo pačiu vienos celės sukurtas pagrindo 124 arba kito konstrukcijos elemento sukeltos deformacijos dydis priklauso nuo celės elementų matmenų, proporcijų, keleto celių tarpusavio sujungimo būdo bei visos struktūros elementus sudarančių medžiagų savybių. Šie parametrai parenkami ir optimizuojami vykdiklio konstravimo metu, pagal numatytas tikslines vykdiklio savybes.

Nesimetrinių celių išdėstymas vykdiklio plokštumoje gali būti simetrinis pasirinktos simetrijos ašies ar simetrijos centro atžvilgiu, nesimetrinis, žiedinis, ir įvairūs kiti variantai. Celių išdėstymas parenkamas vykdiklio projektavimo ir konstravimo metu, yra optimizavimo objektas ir priklauso nuo tikslinių vykdiklio savybių. Paveiksluose 2b ir 2c parodyta, kad AJM jutiklio atveju parinkta vykdiklio centrinės ašies atžvilgiu simetriška talpinių celių orientacija. Į kairę nuo simetrijos ašies esančios celės orientuotos taip, kad inkarinė atrama 126 būtų orientuota į dešinę, o dešinėje simetrijos ašies pusėje esančių celių inkarinė atrama 126 orientuota į kairę. Tokia celių orientacija sąlygoja, kad simetrijos ašies priešingose pusėse esančių celių sukurti sukimo momentai 127 bus priešingi ir sumuosis vykdiklio judančio pagrindo 110 centrinėje dalyje, kurioje yra AJM liestukas 100. Tokiu būdu, įvyks judraus pagrindo 110 centrinės dalies maksimali deformacija vertikalia kryptimi.

Paveiksle 2a parodytas vykdiklio pagrindu realizuoto AJM jutiklio vaizdas iš AJM liestuko 100 pusės. Stacionarus įtaiso pagrindas 101 yra atskirtas nuo judančio pagrindo 110 įgilinimais 103, kurie turi pertrūkius kampuose 103". Kampiniai pertrūkiai pagerina įtaiso mechaninį stabilumą ir yra naudojami elektriniams

sujungimams su stacionariame pagrinde 101 esančiomis kontaktinėmis aikštelėmis 109 (viršutiniam elektrodui prijungti) ir 106 (apatiniam elektrodui prijungti). Įgilinimas 103 (2 pav. b-c) užsibaigia talpinių celių membranoje, užtikrinant perimetrinio tvirtinimo hermetiškumą. Įgilinimo 103 paskirtis yra sukurti reikiamą elastingumą judančio pagrindo 110 perimetre. Įgilinimo 103 konstrukcija ir forma gali būti įvairi. Įgilinimo 103 formos ir jo skerspjūvio profilio projektavimas ir optimizavimas sprendžiamas konkretaus įtaiso konstravimo metu. Paveiksle 2b-c taip pat parodytas vykdyklio surinkimo su spausdinto montažo plokšte 102 būdas. Spausdinto montažo plokštė turi laidininkų 107 visumą, kurie naudojami elektriškai ir mechaniškai prijungti vykdyklį prie AJM elektronikos, naudojant lydmetalo rutuliukus 105. Taip pat, spausdinto montažo plokštėje gali būti sumontuota vykdyklio deformacijos optinio nuskaitymo sistema 108, matuojanti šviesos atspindį nuo vykdyklio viršutinio elektrodo 104. Galimi ir kiti AJM signalo nuskaitymo būdai, pavyzdžiui, matuoti elektrinį talpumą.

Paveiksle 6 diagramoje parodytas vykdyklių su įvairiais matmenimis statinis vertikalus centrinio taško poslinkis, kai talpinės celės veikia pritraukimo (kolapso) režimu. Skirtingos kreivės atitinka skirtingus skersinius perimetru įtvirtintos struktūros matmenis. Diagramos horizontalioje ašyje atidėtas netiesinis talpinių celių parametras ϑ , kuris yra tiesiškai susijęs su kolapso įtampa. Šis parametras įvertina santykį tarp kritinių talpinės celės matmenų: membranos storio h , membranos kraštinės a ir tarpelio g :

$$\vartheta = \sqrt{\frac{h^3 g^3}{a^4}}. \quad (12)$$

Ištisinė linija iliustruoja pritraukimo įtampą, pagal dešinę vertikaliąją ašį. Poslinkiai parodyti 15 μm storio („storis“ čia yra judančio pagrindo 110 storis, neįvertinant spyruoklinių struktūrų 103 storio) kvadrato formos vykdykliams, kurių kraštinė kinta nuo 100 μm iki 1000 μm („kraštinė“ čia yra judančio pagrindo 110 kraštinė, pagal 1b pav.). Kraštinės dydis įrašytas skaičiais pertraukiant atitinkamus struktūros centrinio taško įlinkius rodančias linijas. Atitinkamai, kintant struktūros kraštinės dydžiui, talpinių celių, telpančių į vieną eilę, skaičius keitėsi nuo 14 iki 26, padengiant atitinkamą kritinių celių matmenų įvairovę. Iš 6 pav. diagramos akivaizdu, kad perimetru įtvirtintos struktūros gali būti naudojamos gauti palyginti didelius (kelių

mikrometrų) statinius poslinkius, naudojant palyginti žemas (iki 200V) įtampas. Tinkamai optimizavus talpinių celių ir judančiojo pagrindo 110 matmenis, adekvačiomis sąlygomis galima pasiekti judančio pagrindo 110 vertikalius iki 20 μm poslinkius, atitinkančius įprastinį AJM jutiklių įlinkio vertikalia kryptimi ruožą, AJM jutikliui veikiant statiniu režimu. Taip pat, šis vykdiklis gali būti žadinamas ir dinaminiais režimais, naudojamais AJM praktikoje. Didesnio ekvivalentinio standumo vykdklio struktūros gali būti naudingos AJM uždaviniuose, kur svarbus aukštas žadinimo dažnis ir AJM greیتaveika, o plonesnės - kai svarbus didesnis statinis jautris ir skyra.

Vykdklio taikymai. Vieno kanalo AJM jutiklis. Vienas galimų vykdklio panaudojimo atvejų parodytas 2 paveiksle. Čia pavaizduota vieno kanalo AJM jutiklio su integruota optinio nuskaitymo sistema, konstrukcija. AJM liestukas 100 suformuotas vykdklio judraus pagrindo 110 išorinėje pusėje. Vykdklio judrus pagrindas 110 gali būti pagamintas iš elektrai laidžios medžiagos su palyginti aukštu elastingumo moduliui, pavyzdžiui, stipriai legiruoto monokristalinio silicio ar kitos tinkamos medžiagos. Vykdklio judrus pagrindas 110 per spyruoklinę struktūrą 103 jungiasi su mechaninį tvirtumą užtikrinančia dalimi periferijoje 101, vadinamą stacionariu (nejudančiu) pagrindu. Judraus pagrindo 110 vidinėje (2b-c paveiksluose - viršutinėje) pusėje suformuotas tam tikras skaičius asimetrinių elektrostatių celių. Asimetrinių elektrostatių celių membranos 120 yra elektriškai izoliuotos nuo judriojo pagrindo 110 ir, drauge su atraminiais elementais 123 bei 126 sudaro hermetiškas vakuumo ertmes. Apatinis elektrodas 125, integruotas su judančiu pagrindu 110, kuris yra elektriškai ir mechaniškai bendras visoms elektrostatinėms celėms. Viršutinis elektrodas 104 gali būti bendras visoms elektrostatinėms celėms arba gali būti keletas viršutinių elektrodų, grupuojančių celes į funkcines grupes. Talpinių celių struktūra, naudojama iliustruoti vieno kanalo AJM vykdklį yra visiškai analogiška 1-me paveiksle detaliai parodytai struktūrai, o jų veikimas atitinka paaiškinimą šio išradimo aprašymo skyriuje „Bazinė vykdklio konstrukcija ir veikimas“. Apatinis elektrodas elektriškai sujungiamas su kontaktine aikšte 106, o viršutinis elektrodas (elektrodai) jungiami su vienu ar keletu prijungimo aikštelių 109, kurios yra elektriškai izoliuotos nuo pagrindo 101. Vykdklis elektriškai ir mechaniškai jungiamas tiesiogiai su nešančia ir reikiamus elektronikos komponentus turinčia spausdinto montažo plokšte 102, naudojant lydmetalo rutuliukus 105. Nešanti plokštė 102 taip pat turi ir

elektrinių sujungimų 107 laidininkus, naudojamus jutiklio prijungimui prie signalą formuojančios elektronikos. Nešanti plokštelė 102 yra mechanškai sujungiama su mikroskopo elektromechaniniu pozicionieriumi, o elektriškai – su signalą apdorojančia elektronika. Abu pastarieji mazgai gali būti standartiniai AJM mazgai ir nėra šio išradimo objektai. Optinio nuskaitymo sistema 108 taip pat litavimo būdu montuojama ant laikančios plokštelės 102 laidininkų. Ji skleidžia šviesą ir nuskaityto atspindį nuo viršutinio elektrostatinėlių celių paviršiaus 104. Atspindžio intensyvumas moduluojamas judant judriam pagrindui 110. Praktiniai šio integruoto AJM jutiklio skersiniai matmenys (neįvertinant spausdinto montažo plokštės 102 gabaritų) gali siekti nuo vieno iki keleto milimetrų. Paveikslas 2c detalizuoja skersinio pjūvio, parodyto paveiksle 2b dalį taip, kad būtų matoma daugiau mikrostruktūros elementų: spyruoklinė struktūra 103, elektrostatinėlių celių membranos 120 ir šių celių vakuumo tarpeliai 121.

Paveikslas 2d iliustruoja atvejį, kai AJM jutiklio visos talpinės celės veikia vienu metu, ir pjūvyje matomas simetrinis pagrindo įlinkis. Šiuo atveju, visos elektrostatinės celės yra veikiamos elektrostatinės jėgos, sukeltos elektros krūvio tarp viršutinių elektrodų ir apatinių elektrodų, ir veikdamos visos drauge, deformuoja judrųjį pagrindą 110, kaip detalai paaiškinta ankstesniame šio išradimo aprašymo skyriuje. Taip AJM liestukas 100, sumontuotas ant judrojo vykdiklio pagrindo, judės tiesiai žemyn. Praktinis vertikalaus liestuko judesio ruožas priklausys nuo esamų struktūros matmenų ir ją sudarančių medžiagų savybių.

Paveiksle 2e parodytas AJM jutiklio vertikalus skersinis pjūvis nesimetrinio įlinkio atveju. Šiuo atveju dešinioji (pagal paveikslą) talpinių celių grupė yra veikiamas elektrostatinės jėgos. Vienoje pagrindo pusėje celių grupės sukelti sukimo momentai sukels asimetrinę judančiojo pagrindo deformaciją, ir liestukas 100 bus pasuktas kairėn, kaip parodyta paveiksle. Punktyrinė liestuko linija 100' rodo griežtai vertikalų (be pasukimo) jutiklio liestuko judėjimą. Paveikslas 2e iliustruoja atvejį, kai veikiant tik pusei elektrostatinėlių celių, struktūra deformuojama asimetriškai, liestukui 100 suteikiant papildomą sukamąjį judesį. Galimybė liestukui suteikti papildomą sukamąjį judesį yra unikali šio išradimo panaudojimo pavyzdžio savybė, kuria galima pasinaudoti modifikuotiems skenavimo režimams bei didesnei trimatei AJM skyrui sukurti.

Daugiakanalis AJM jutiklis. Kitas taikymo pavyzdys yra vienmatis arba

dvimatis AJM jutiklių masyvas, kurį sudaro integruotos anksčiau paaiškintam vienkanaliam AJM jutikliui ekvivalentiškos vykdklio struktūros. AJM jutiklių masyvo su keturiais liestukais 100 skersinis pjūvis parodytas 4a paveiksle. Liestukų skaičius gali būti įvairus, priklausomai nuo konkretaus taikymo. Paveiksle 4a parodyta koncepcija tinka ir matricinei (dvimatei) AJM jutiklio konfigūracijai, kuri parodyta 4b paveiksle. Tiek vienmačiame, tiek dvimačiame AJM jutiklių masyve, kiekvieno AJM jutiklio liestukas 100 gali būti individualiai elektrostatiškai žadinamas tam tikru elektrostatiinių celių 203 skaičiumi. Elektrostatinės celės 203 yra susietos su AJM jutiklių judriuojų pagrindu 110, analogiškai, kaip 1-me paveiksle parodyto vienetinio vykdklio atveju; 4a paveiksle elektrostatinė celė 203 apima 1-me paveiksle parodytus struktūrinius elementus: viršutinį elektrodą 104, membraną 120, vakuumo tarpelį 121 ir judrųjį pagrindą 110. Nejudantis įtaiso pagrindas 101 yra ekvivalentiškas 1-me paveiksle parodytai atitinkamai struktūrai. Elektrostatinės celės 203 žadinamos viršutiniais elektrodais 104, kurie yra elektriškai izoliuoti nuo judriojo pagrindo 110, turi šviesą atspindintį paviršių ir jungiami prie išorinės elektronikos per kontaktines aikšteles 109. Apatinis elektrodas yra integruotas su judriuojų pagrindu 110 ir su išorine valdymo elektronika sujungtas per kontaktinę aikštelę 106. Visas vykdklis lydmetalio rutuliukais 105 prilituotas prie optiškai skaidrios laikančios plokštelės 202, kurioje sumontuotas vienmatis ar dvimatis optinio nuskaitymo elementų masyvas 208. Optinio nuskaitymo sistemos tinkamas realizacijos variantas yra optinių porų, sudarytų iš šviesos (lazerinio) diodo ir fotodiodo, AJM jutiklių kiekį masyve atitinkantis skaičius. Kitas galimas realizacijos variantas: didelio greičio CMOS vaizdo jutiklis su šoninio apšvietimo elementais. Laikančioji plokštelė 202 apima laidininkų 107 tinklą, apjungiantį daugiakanalio AJM jutiklio elementus su išorine valdymo elektronika. Praktiniai atskirų AJM jutiklių masyvo elementų matmenys gali atitikti įprastinio vieno kanalo AJM regos lauko matmenis. Pavyzdžiui, atstumas tarp gretimų liestukų 200 gali būti 100–200 μm ruože. Tokiu būdu gaunamas duomenų, gautų keliais AJM jutikliais įprasto skenavimo proceso metu, sujungimas į kokybišką didelį regos lauką (aprašytame pavyzdyje su 4x4 AJM jutiklių matricos regos laukas atitinkamai - nuo 400x400 μm iki 800x800 μm). Didesnis regos laukas leidžia praplėsti AJM taikymo galimybes ir pagreitinti duomenų gavimą iš didesnių AJM tiriamų plotų. Minėtų matmenų ruože yra efektyvesnis/tinkamesnis rezonansinis AJM jutiklio darbo režimas. Praktinis rezonansinių dažnių ruožas yra nuo 1 iki 2 MHz.

Paveiksle 4b parodytas kitas išradimo taikymo pavyzdys, kuriame daugiakanalis AJM jutiklis realizuotas vykdiklių dvimačio masyvo (matricos) pagrindu ir turi dvimatį AJM liestukų 100 masyvą. Įtaiso nejudrusis pagrindas 101, kaip ir 4a parodyto vienmačio masyvo atveju, yra bendras visiems matricos vykdikliams 200. Vieno masyve veikiančio vykdiklio 200 mikrostruktūra yra ekvivalentiška kitose iliustracijose parodytiems vykdiklio elementams.

Skysčių mikrosrautų valdiklis. Dar vienas vykdiklio panaudojimo pavyzdys yra skysčių srautų valdymas mikrosrautų įtaisuose. Šis pavyzdys yra iliustruotas 3-me paveiksle.

Paveiksle 3a parodyta, kaip perimetru hermetiškai įtvirtintas vykdiklių masyvas gali būti naudojamas mikrosrautų įtaise. Vaizdas pateikiamas išilginiu mikrosrautų kanalo skerspjūviu. Judrusis vykdiklio pagrindas 300, dėl jo viršutiniame paviršiuje integruotų elektrostatiinių celių membranų deformacijų (žr. 1 pav.), sukuria įlinkį mikrokanalo 301 viršutinėje sienelėje. Mikrokanalas 301 sumontuotas ant pagrindo 302. Tinkamai parinkus laiko momentus, kuriais žadinami vykdiklio elementai, sukuriamas peristaltinis nespūdaus skysčio pumpavimas pasirinkta kryptimi 303. Vykdiklio elementas 300 turi parinktą reikiamą elektrostatiinių celių skaičių, kuris optimizuotas pagal taikymo sritį ir mikrokanalo matmenis. Mikrokanalo plotyje gali būti įrengta vienas ar daugiau vykdiklių, priklausomai nuo reikiamų mikrosrauto valdymo charakteristikų.

Paveiksle 3b pavaizduota (iš viršutinės perspektyvos) mikrosrauto kanalo 301 dalis ir jo viršutinėje sienelėje sumontuotas peristaltinis siurblys, sudarytas iš keturių integruotų vykdiklių 300. Siurblio vykdikliai žadinami tam tikra tvarka - taip, kad lokaliai dinamiškai sukurdami slėgį mikrokanale 301 esančiame nespūdžiam skystyje, sukurtų pasirinktos krypties skysčio srautą 303. Vykdiklių 300 matmenys ir jų skaičius mikrokanalo 301 plotyje parenkamas pagal numatytas mikrosrauto valdymo charakteristikas.

Paveiksle 3c parodytas vienetinio vykdiklio 300 panaudojimas mikrosrautų vožtuvo funkcijai atlikti. Mikrosrautų įtaisas 305 turi atšaką link vožtuvo ir šios atšakos mikrokanalą siaurinančios pertvaros 304. Elektrostatiškai sužadinus vykdiklį 300, jo išlinkio profilis sutaps su mikrokanalo pertvaros 304 viršutiniu profiliu, taip uždarydamas skysčio srautą atšakoje. Vykdiklių matmenys ir vožtuvų virš siaurinančios pertvaros 304 skaičius gali būti įvairūs, priklausomai nuo pageidaujamų

įtaiso techninių charakteristikų.

Vykdiklio gamybos būdas. Aprašyti vykdiklio realizacijos variantai gali būti pagaminti naudojant su CMOS procesais suderinamais mikromontavimo procesais.

Išradimas apima vykdiklio gamybos technologiją, kuri paremta plokštelių sujungimo ir giluminio mikromontavimo procesais, ir kurios esminiai žingsniai pavaizduoti 5-me paveiksle.

Gamyba pradedama parengiant dvi silicio plokšteles, kaip parodyta 5a paveiksle. Paveikslas 5a vaizduoja dvi parengtas plokšteles: 400 – monokristalinio silicio plokštelė su terminio oksidavimo ir litografijos metodais suformuotomis pomembraninėmis talpinių celių mikrostruktūromis 403; 401 – monokristalinio silicio plokštelė su izoliuoto silicio sluoksniu 402 (SOI). Sąvoka „pomembraninės struktūros“ čia apima eilę 1-me paveiksle parodytų struktūrinių elementų (žr. 1 pav.): inkarinę atramą 126, apatinį elektrodą 125 ir vertikalią atramą 123. Šie elementai giluminio ėsdinimo būdu formuojami iš stipriai legiruoto monokristalinio silicio, sudarančio plokštelę 400. Atraminiai elementai, skirti sujungimui su SOI plokštele 401, t.y. inkarinė atrama 126 ir vertikali atrama 123 pagal 1 pav., yra selektyviai oksiduojami, naudojant lokalaus terminio oksidavimo procesą (LOCOS). Taip suformuojamas elektinę izoliaciją užtikrinantis sluoksnis, kurio vietos pažymėtos 405 pozicija, tačiau pats sluoksnis neparodytas, stengiantis išlaikyti paprastesnį brėžinį. Pomembraniniai elementai taip pat gali būti išėsdinti termiškai suformuotame silicio oksido sluoksnyje, taip išvengiant selektyvaus atraminių elementų oksidavimo žingsnio. Tokiu atveju apatinio elektrodo 125 paviršius dar iki plokštelių sujungimo turi būti padengiamas elektriškai laidžia medžiaga, pavyzdžiui, legiruotu polikristalinio silicio sluoksniu. Pastarasis sluoksnis turi būti elektriškai sujungiamas su plokštelės 400 masyvu.

Paveiksle 5b parodytos terminio sulydymo būdu sujungtos ir iki reikiamo storio suplonintos plokštelės. Plokštelės ploninamos naudojant mechaninio ir cheminio šlifavimo bei poliravimo metodus (CMP), poliravimą užbaigiant aukštos kokybės paviršiumi, tinkamu plonų sluoksnių nusodinimui ir litografijai. 404 – cheminio nusodinimo iš garų ir litografijos metodais suformuota apsauginė silicio nitrido kaukė, parengta po plokštelių sujungimo ir suploninimo.

Toliau, gilaus joninio-plazminio ėsdinimo metodu pašalinus kaukę neapsaugotas plokštelės dalis, atlaisvinamos elektrostatinių celių membranos 120,

parodytos paveiksle 5c. Plokštelėje 401 tarp nešančiojo silicio masyvo ir įtaisų sluoksnio 402 esantis plonas oksido sluoksnis (angl. buried oxide) atlaisvinimo metu veikia kaip ėsdinimą vertikalia kryptimi sustabdantis barjeras. Kauke apsaugotos plokštelės dalys sudaro nejudantį vykdiklio pagrindą 110. Esant reikalui (jei to reikalauja elektrinių sujungimų logika), po membranų atlaisvinimo, išorinis jų paviršius ir likęs silicio masyvas, sudarantis nejudantį pagrindą 101, gali būti padengiamas plonu silicio oksido sluoksniu, taip užtikrinant elektrinę izoliaciją. Elektrostatinės celės metalizuojamos nusodinant ir litografijos būdu suformuojant ploną metalo sluoksnį, kuris veikia kaip viršutinis elektrodas ir kaip kontaktinės aikštelės 109. Viršutiniojo elektrodo sujungimas su kontaktinėmis aikštelėmis 109 yra atliekamas nusodinant metalo garus kampu ir(arba) naudojant nusodinimo kaukę taip, kad gautas plonas metalo sluoksnis padengtų šonines pagrindo 101 sienes. Jei pagamintas vykdiklis bus naudojamas agresyvioje ir (arba) elektriškai laidžioje aplinkoje, po šio technologinio žingsnio atliekamas išorinės įtaiso pusės (apačioje pagal paveikslą) pasyvavimas, cheminiu-plazminiu būdu nusodinant ploną silicio nitrido sluoksnį. Vidinės vykdiklio pusės, kurioje yra viršutiniai elektrodai ir kontaktinės aikštelės, pasyvuoti nereikia, nes vykdiklio konstrukcija yra hermetiška, t.y. apsaugota nuo aplinkos. Po vykdiklio surinkimo su elektronikos plokšte ir (arba) mikrosrautų įtaisu, elektriniai sujungimai gali būti papildomai apsaugomi nuo aplinkos.

Paveiksle 5d parodytas AJM liestukų 100 masyvas, kuris gali būti suformuojamas vykdiklio apatinėje (pagal paveikslą) pusėje, naudojant adityvinę gamybos technologiją. Pavyzdžiui, liestukai 100 gali būti suformuoti 3D-nanospausdinimo būdu, dvifotoninės polimerizacijos būdu [7]. Taip pat liestukai gali būti suformuojami ant plokštelės 400, jos ploninimo metu, atitinkamai kombinuojant cheminio ir plazminio-cheminio ėsdinimo metodus su ėsdinimą maskuojančiomis kaukėmis prieš arba po CMP proceso [8]. Yra žinoma keletas AJM liestukų formavimo technologijų [9], kurios nėra šio išradimo objektas, bet dauguma jų gali būti sėkmingai pritaikytos šio išradimo taikymo variantuose.

NEPATENTINĖS LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. S. R. Manalis, S. C. Minne and C. F. Quate, "Atomic force microscopy for high-speed imaging using cantilevers with an integrated actuator and sensor", Appl. Phys. Lett., vol. 68, no. 6, pp. 871-873, February 1996.
2. S. C. Minne, G. Yaralioglu, S. R. Manalis, J. D. Adams, J. Zesch, A. Atalar, et al., "Automated parallel high-speed atomic force microscopy", Appl. Phys. Lett., vol. 72, no. 18, pp. 2340-2342, May 1998.
3. Cao, W., Alsharif, N., Huang, Z. et al. Massively parallel cantilever-free atomic force microscopy. Nat Commun 12, 393 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20612-3>
4. P. Vettiger et al., "The "Millipede"—More than thousand tips for future AFM storage," in IBM Journal of Research and Development, vol. 44, no. 3, pp. 323-340, May 2000, doi: 10.1147/rd.443.0323.
5. Seong, M., Somnath, S., Kim, H. J. & King, W. P. Parallel nanoimaging using an array of 30 heated microcantilevers. RSC Adv. 4, 24747–24754 (2014).
6. E. Haeggstrom, G. G. Yaralioglu, A. S. Ergun and P. T. Khuri-Yakub, "Capacitive micromachined ultrasonic transducer based integrated actuator for atomic force microscope cantilevers," Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Nanotechnology, Washington, DC, USA, 2002, pp. 45-49, doi: 10.1109/NANO.2002.1032120.
7. Alsharif, N., Burkatovsky, A., Lissandrello, C., Jones, K. M., White, A. E., Brown, K. A., Design and Realization of 3D Printed AFM Probes. Small 2018, 14, 1800162. <https://doi.org/10.1002/sml.201800162>
8. Mizuki Ono, Dirk Lange, Oliver Brand, Christoph Hagleitner, Henry Baltes. (2002) A complementary-metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor-compatible atomic force microscopy tip fabrication process and integrated atomic force microscopy cantilevers fabricated with this process. Ultramicroscopy 91:1-4, 9-20.
9. Chang Liu. (2008) Parallel scanning probe arrays: their applications. Materials Today 11, 22-29. Online publication date: 1-Jan-2008.
10. Thomas Sulzbach, Wolfgang Engl, Reinhard Maier, Jörg Diebel, Dr.

Denis Dontsov, Enrico Langlotz, Dr. Walter Schott. (2010) Cantilever arrays with integrated actuation and sensing for parallel SPM. *Procedia Engineering* 5, 621-624.

11. A. G. Onaran et. al. A new atomic force microscope probe with force sensing integrated readout and active tip. February 2006 *Review of Scientific Instruments* 77(2).

12. Conrad, H., Schenk, H., Kaiser, B. et al. A small-gap electrostatic micro-actuator for large deflections. *Nat Commun* 6, 10078 (2015). <https://doi.org/10.1038/ncomms10078>.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Elektrostatiskai žadinamas mikroelektromechaninis vykdiklis, apimantis mažiausiai

vykdiklio membraną (120) su pirmuoju elektrodu,

plokštelės formos deformuojamą elementą (110) su antruoju elektrodu, ir

atraminius elementus (123, 126), atskiriančius vakuumo tarpeliu (121) deformuojamą elementą (110) ir vykdklio membraną (120) bei apjungiančius juos į elektrostatiskai žadinamą dvisluoksne struktūrą,

b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad atraminiai elementai (123, 126) dalija šią struktūrą į daugiau nei vieną hermetiškas celes, hermetiškai atskirtas atraminių elementų (123, 126) uždromis linijomis, kur kiekvienos celės atraminių elementų uždara linija apima bent du segmentus (123), (126), kur

pirmasis segmentas yra inkarinė atrama (126), nekintanti nuo elektrostatinio pritraukimo metu vykstančių deformuojamo elemento (124, 110) ir/arba vykdklio membranos (120) deformacijų, o

antrasis segmentas yra likusi atraminės linijos dalis (123), kuri deformuojasi dėl elektrostatinio pritraukimo metu vykstančių vykdklio membranos (120) deformacijų, sukurdamą celėje lokų sukamąjį momentą (127), kuris deformuoja vykdklio deformuojamą elementą (110).

2. Vykdklis pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad minėta elektrostatiskai žadinama dvisluoksne daugiacele struktūra yra stačiakampė plokštelė, kuri visu perimetru hermetiškai įtvirtinta vykdklio stacionariame pagrinde (101).

3. Vykdklis pagal 1–2 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad vykdklio pavienė celė plane yra uždara stačiakampė, kvadratinė, trikampė, daugiakampė, apvalios ar netaisyklingos formos, o celės atraminiai segmentai (126) ir (123) elementai bei jų aukštis parenkami pagal celės numatytas deformacines savybes ir reikiamą vertikalų sukamąjį momentą (127).

4. Vykdiklis pagal 1–3 punktus, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad pirmasis elektrodas yra bendras visoms vykdiklio talpinėms celėms, o antrasis elektrodas yra arba bendras visoms vykdiklio celėms, arba apima daugiau nei vieną elektriškai atskirą elektrodą, susietą su daugiau negu viena celių grupe.

5. Vykdiklis pagal 1–3 punktus, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad vykdiklio dvisluoksnė daugiacele struktūra turi jos elastingumą didinančius elementus (103, 103^a), kurie realizuoti kaip paviršiaus įgilinimai arba grioveliai vykdiklio membranoje (120) ties perimetrinio tvirtinimo linija ir/arba deformuojamame elemente (110) tarp gretimų celių.

6. Vykdiklis pagal 1–3 punktus, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad daugiau nei viena gretimos vykdiklio celės yra suformuotos jų asimetrinių formų priešingomis kryptimis, kad joms veikiant vienu metu sustiprinti deformuojamo elemento (110) deformacijas.

7. Vykdiklis pagal 1–3 punktus, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad daugiau nei viena vykdiklio celės yra suformuotos jų asimetrinių formų įvairiomis kryptimis, kad joms veikiant vienu metu, sukurti maksimalias arba daugiakryptes deformuojamo elemento (124) deformacijas.

8. Vykdiklis pagal 1–7 punktus, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad vykdiklio bent viena celė savo viduje apima elektrooptinių signalų nuskaitymo elementus (108), skirtus nuskaityti deformuojamo elemento (120, 110, 124) deformacijos būseną.

9. Vykdiklis pagal 1–8 punktus, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad atominių jėgų mikroskopijos (AJM) uždaviniuose vykdiklis papildomai apima AJM liestuką (100), įtvirtintą vykdiklio daugelio celių struktūros deformuojamo elemento (110) centre.

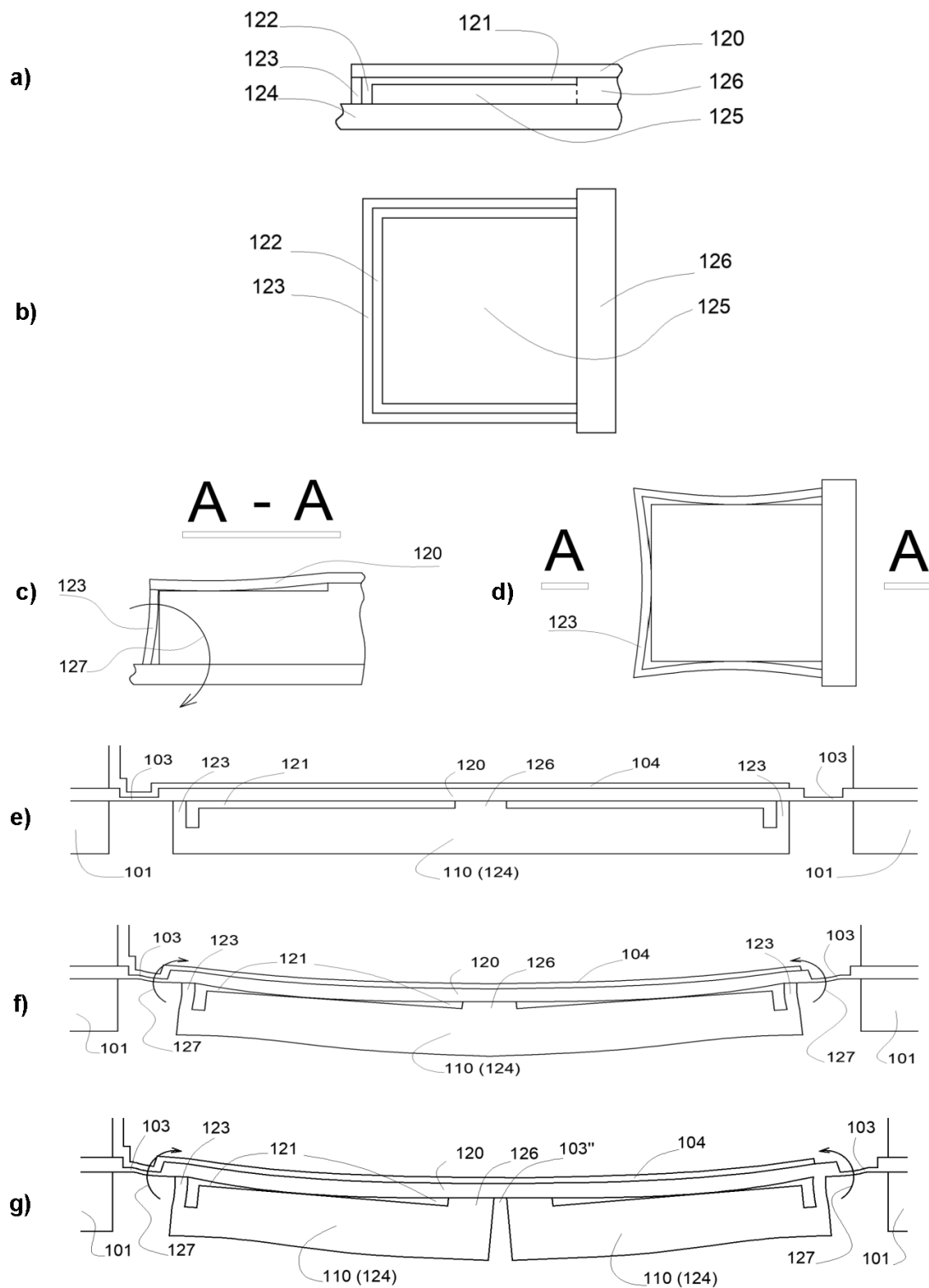
10. Vykdiklis pagal 1–9 punktus, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad AJM uždaviniuose daugiau negu vienas vykdikliai su liestukais (100) yra realizuoti kaip vienmatis AJM jutiklių masyvas arba dvimatė AJM jutiklių matrica.

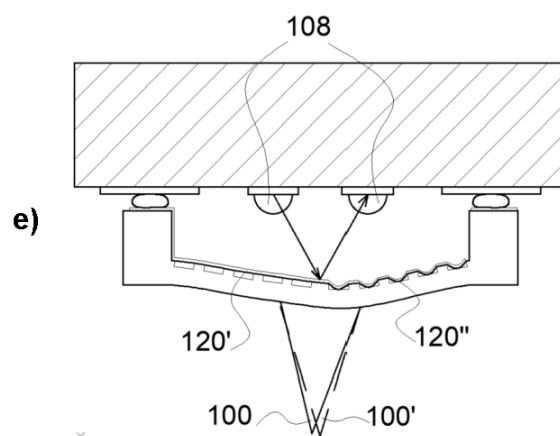
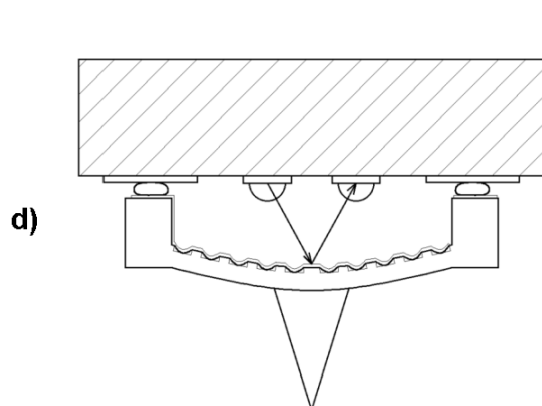
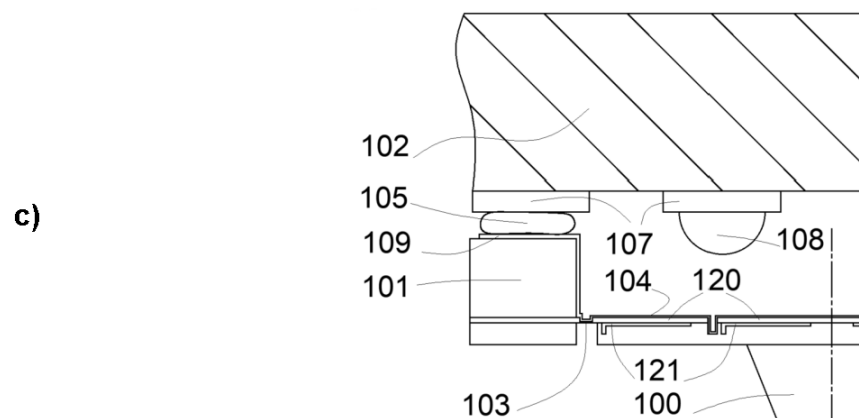
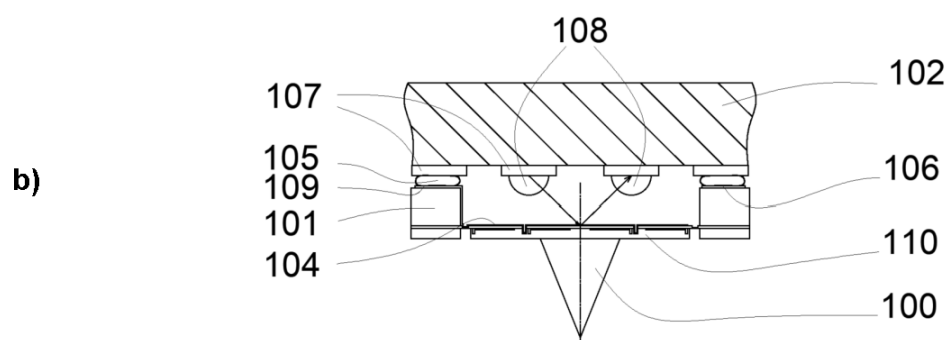
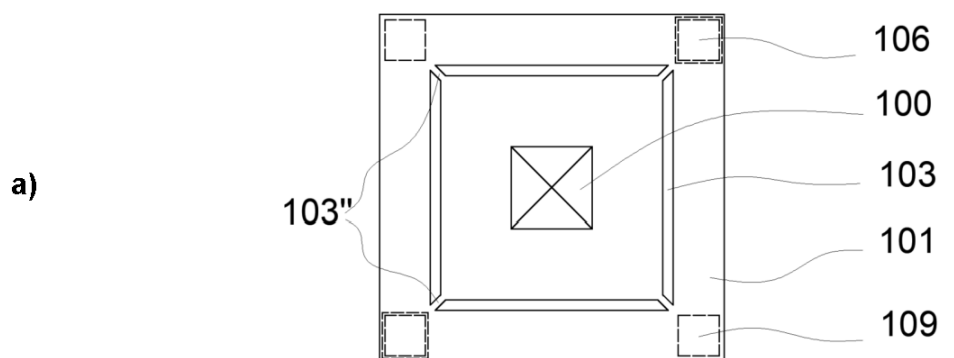
11. Vykdiklis pagal 1–9 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad mikrosrautų valdymo uždaviniuose vykdiklis yra realizuotas atlikti mikrokanaluose (301) skysčių peristaltinio pumpavimo (300) siurblių ir mikrokanalų (301) vožtuvų (304, 300) funkcijas.

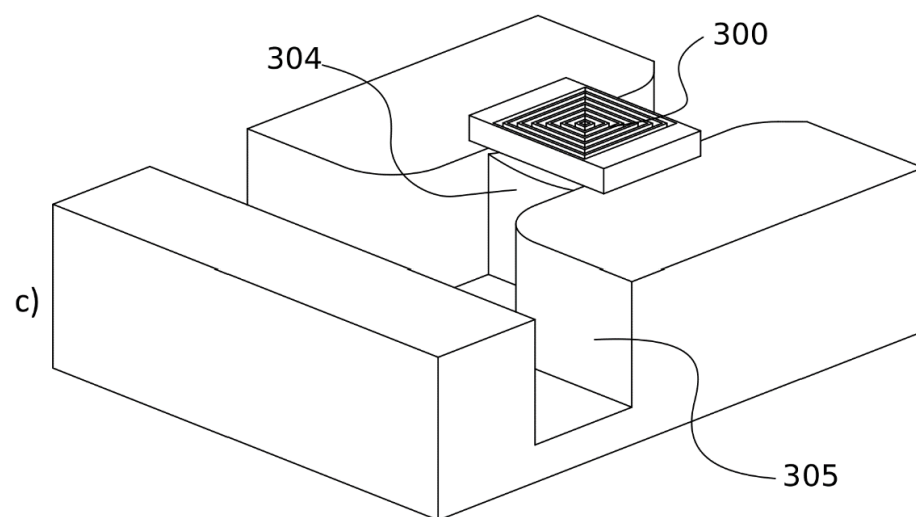
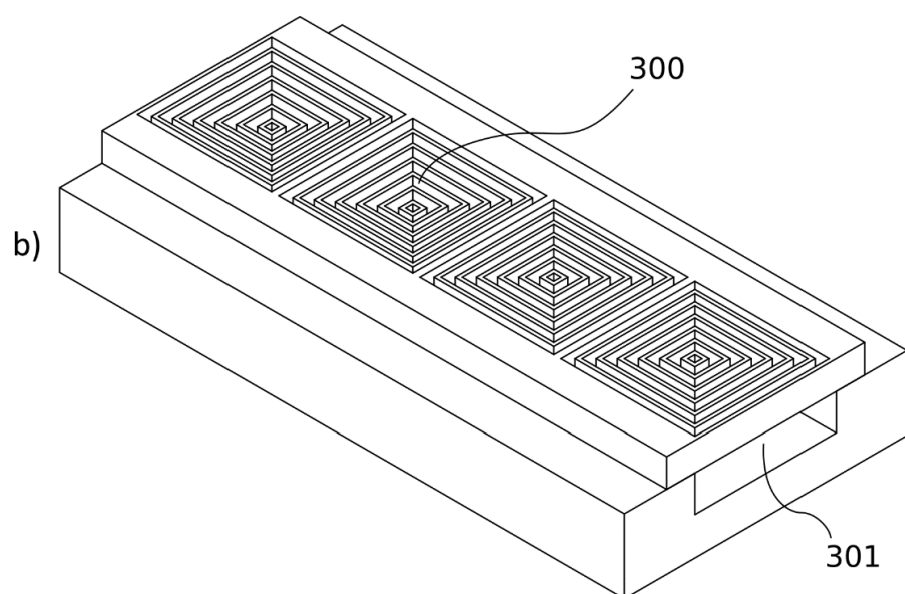
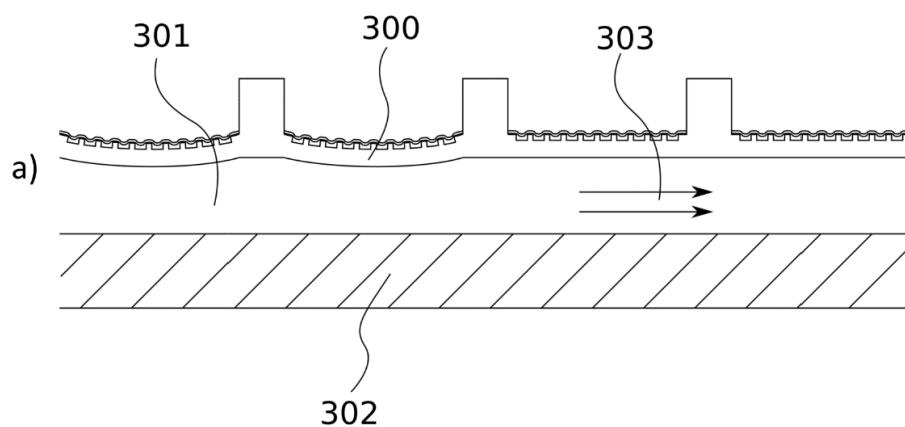
12. Vykdiklio pagal 1 punktą gamybos būdas, suderinamas su CMOS MEMS mikromontavimo procesais, apimantis mažiausiai šiuos žingsnius:

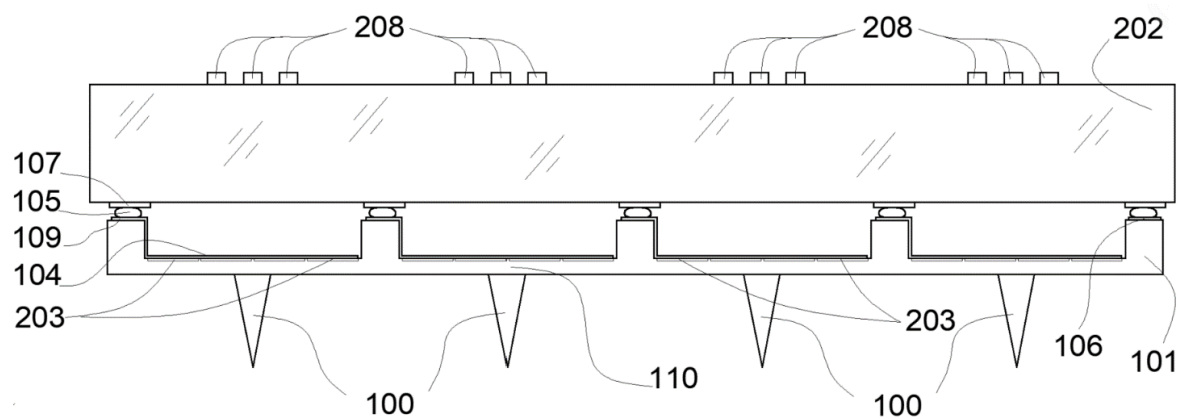
- 1) paruošiama pirmoji legiruoto monokristalinio silicio plokštelė (400) su pomembraninėmis struktūromis (403), suformuotomis monokristalinio silicio arba ploname silicio oksido sluoksnyje, naudojant litografijos ir ėsdinimo žingsnius;
- 2) paruošiama antroji monokristalinio silicio plokštelė (401) su izoliuoto silicio sluoksniu (402), kuris yra stipriai legiruotas ir turi reikiamą elektrostatinį celių membranos storį;
- 3) pirmoji plokštelė (400) ir antroji plokštelė (401) sujungiamos;
- 4) ant sujungtų plokštelių abiejų pusių uždedama apsauginė silicio nitrido kaukė (404), litografijos ir ėsdinimo metodais parengta po plokštelių sujungimo;
- 5) pašalinus kauke neapsaugotas plokštelės dalis, atlaisvinamos elektrostatinį celių membranos (120), o kauke apsaugotos plokštelės dalys suformuoja mechaninio tvirtumo elementus (101), kombinuojant gilaus reaktyvaus joninio ėsdinimo ir ėsdinimo tirpaluose procesus;
- 6) po membranų (120) atlaisvinimo, silicio masyvas padengiamas plonu silicio oksido sluoksniu, taip užtikrinant elektrinę izoliaciją;
- 7) elektrostatinės celės metalizuojamos, nusodinant ploną metalo sluoksnį, kuris veikia kaip viršutinis elektrodas;
- 8) suformuojamos individualios prijungimo aikštelės 109.

13. Būdas pagal 12 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad AJM liestukas (100) arba AJM liestukų masyvas gaminami ant suformuotos elektrostatinio vykdiklio judriojo pagrindo (110), trimačio nanospausdinimo būdu arba suformuojant AJM liestukus ant plokštelės (400), jos ploninimo metu.

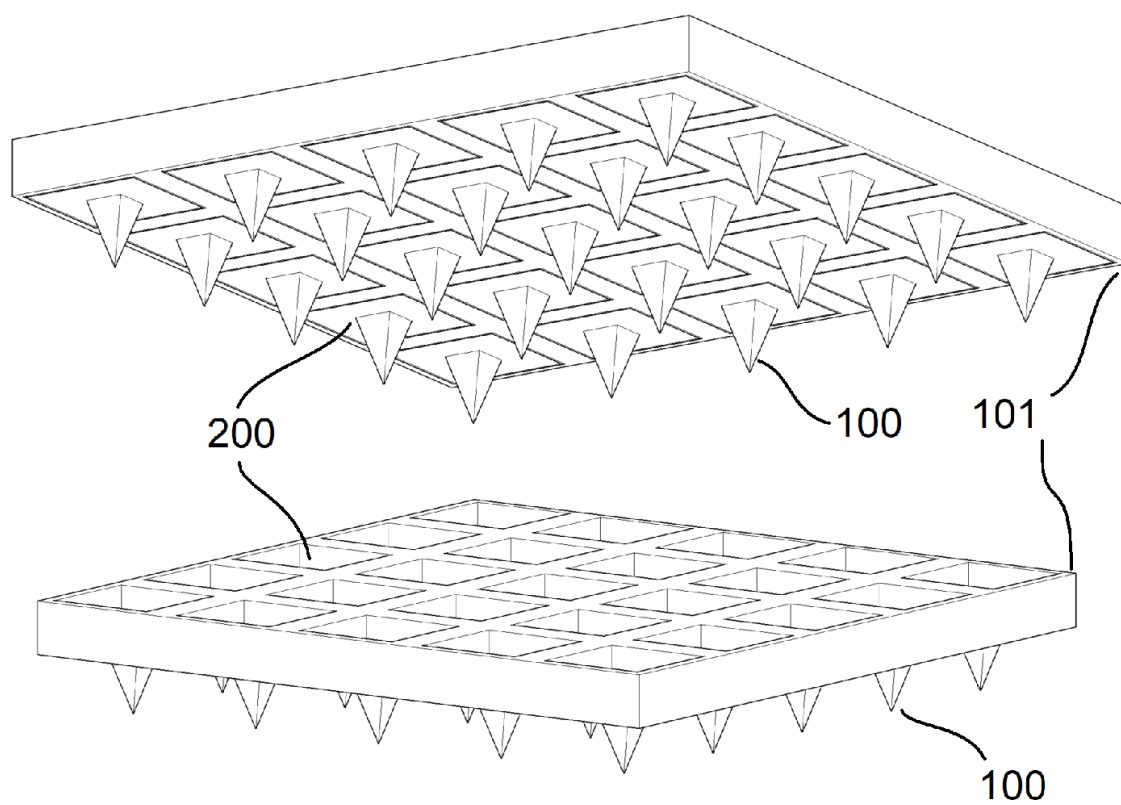




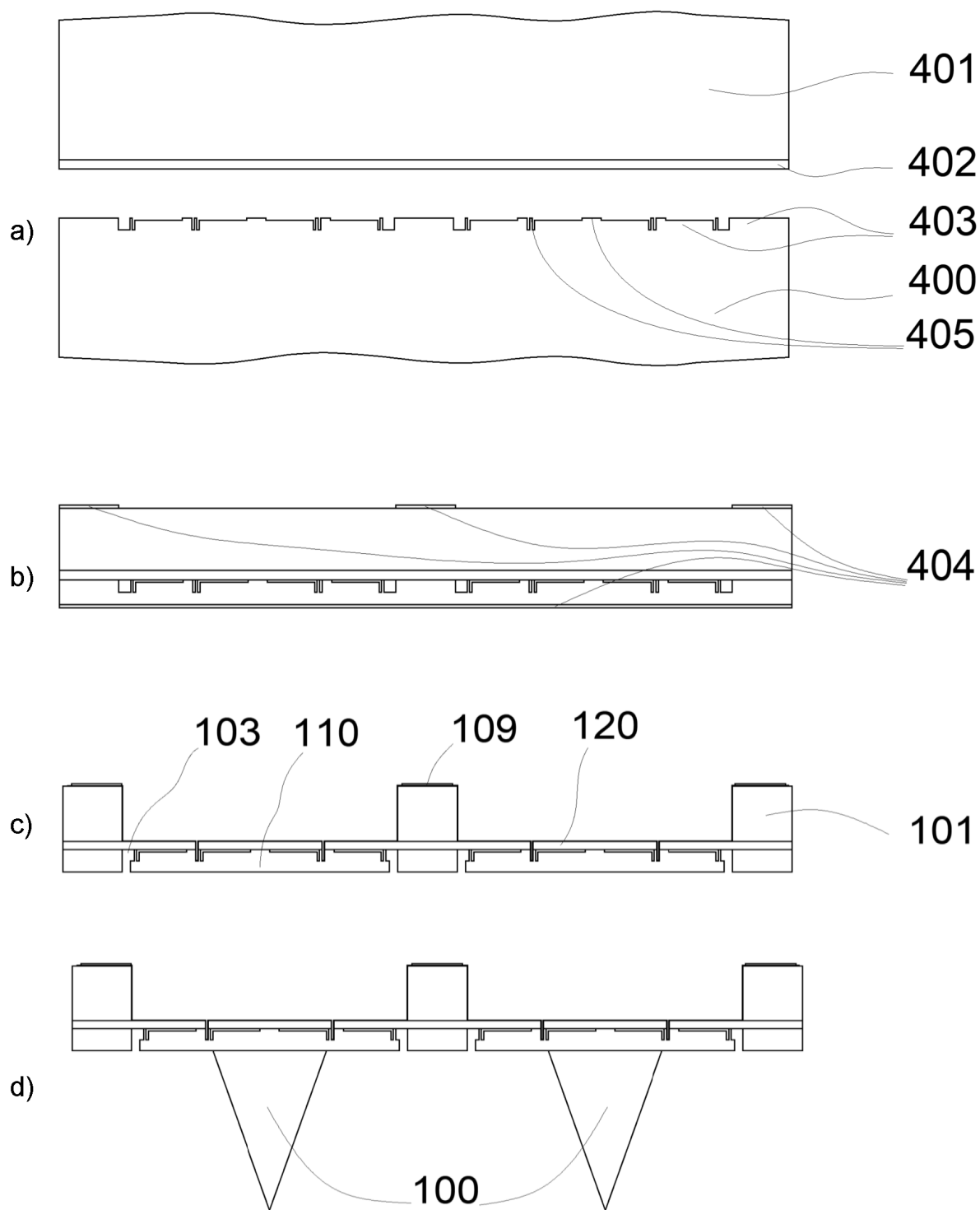


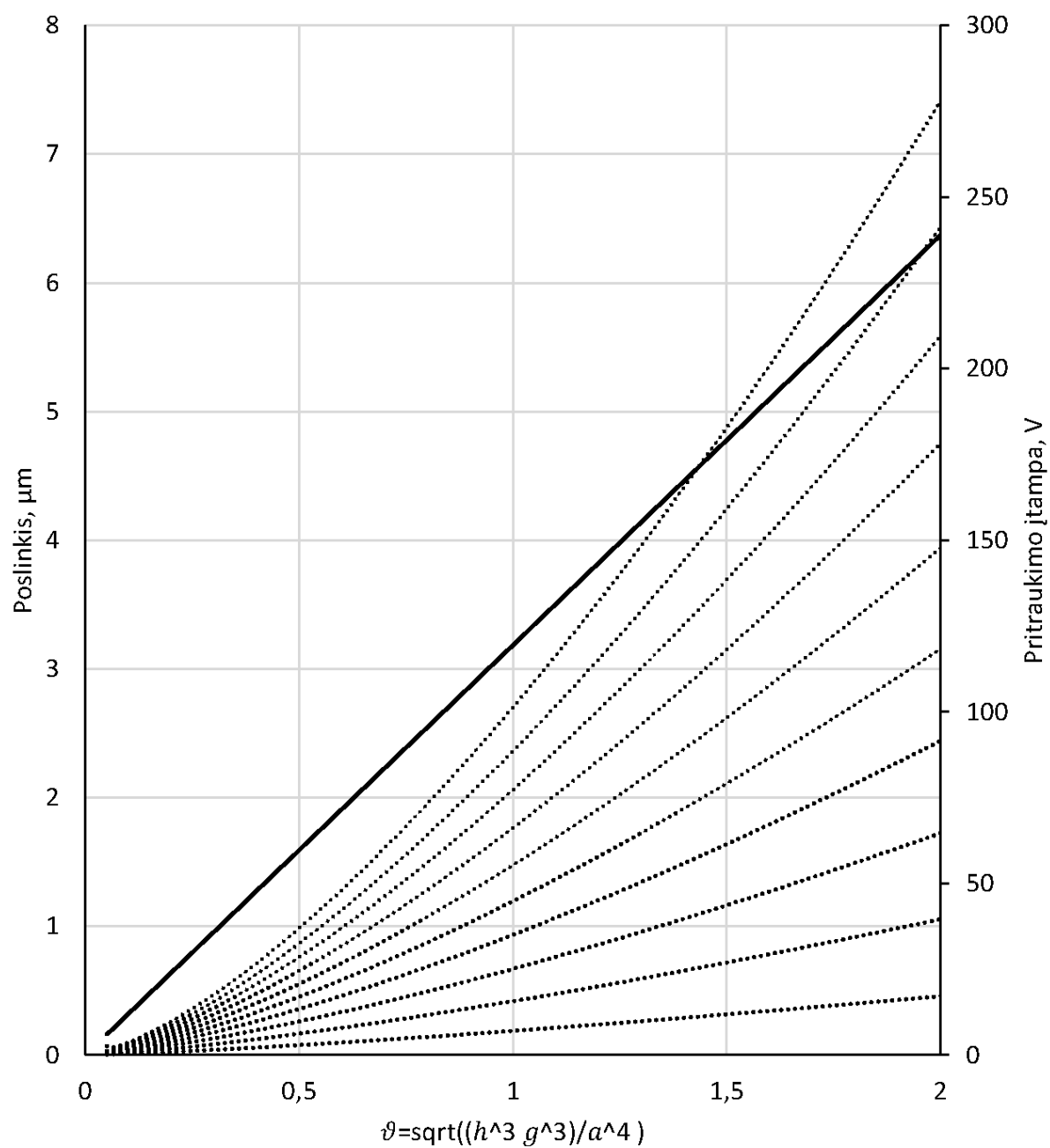


a)



b)





6 pav.