

- (11) Patento numeris: **6791** (51) Int. Cl. (2020.01): **B23K 26/00**
C03B 33/00
- (21) Paraiškos numeris: **2019 028**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2019-05-15**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2020-11-25**
- (45) Patento paskelbimo data: **2020-12-28**
- (62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —
- (85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —
- (30) Prioritetas: —
- (72) Išradėjas:
Mindaugas MIKUTIS, LT
Orestas ULČINAS, LT
Titas GERTUS, LT
Antanas URBAS, LT
- (73) Patento savininkas:
UAB „Altechna R&D“, Mokslininkų g. 6A, LT-08412 Vilnius, LT
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Vitalija BANAITIENĖ, UAB TARPINĖ, A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328
Vilnius, LT

- (54) Pavadinimas:

Skaidrių medžiagų apdirbimo būdas ir įrenginys

- (57) Referatas:

Išradimas yra susijęs su skaidrių medžiagų apdirbimo būdais, naudojančiais ultratrumpuosius lazerio impulsus. Medžiagų, žymia dalimi skaidrių lazerio spinduliuotei, apdirbimo būdas apima necentrosimetrinio nedifraguojančio pluošto suformavimą optiniame elemente, kuriame yra bent dvi dvejopalių struktūrų sritys, kai kiekvienoje tų sričių Pancharantnam'o-Berry fazė kinta pagal tai sričiai būdingą dėsnį. Praėjusios elementą šviesos energijos, fazės bei poliarizacijos skirstinių forma kinta, priklausomai nuo krentančios į elementą šviesos parametrų. Pluošto energijos skirstinys sukuriamas artutinais tolygus šviesos plitimo kryptimi. Lazerio impulso energija parenkama taip, kad ruošinyje sufokusuoto pagrindinio skirstinio maksimumo poveikio srityje susiformuotų pailgos tuštuminių pažaidų sritys norima kryptimi, o gretimų impulsų šalutiniai maksimumai paveiktų ruošinį, sukurdami cheminio pobūdžio pokyčius tarp gretimų impulsų pažaidų. Iš sukurtų pažaidų sričių ir cheminio poveikio sričių suformuojama norimos formos pjūvio linija. Taip apdirbtas ruošinys patalpinamas agresyviame tirpale, kuriame paveiktos sritys tirpsta žymiai sparčiau, negu nepaveiktos, dėl ko ruošinio medžiagoje galima gauti pjūvius su pločio ir gylio santykiu, siekiančiu 1/50.

Technikos sritis

Išradimas priklauso lazerių sričiai ir yra susijęs su skaidrių terpių apdirbimu ir gali būti panaudotas skaidrių terpių tarp jų stiklų, chemiškai grūdintų stiklų, safyrų bei kitokių kristalinių medžiagų pjaustymui, skaldymui ir kitiems apdirbimo procesams panaudojant ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą.

Technikos lygis

Skaidrių terpių ruošiniuose norint išpjauti labai mažų išmatavimo kiaurymes ar atlikti laisvos formos pjūvius, naudojami lazeriniai metodai. Įprastiniai lazerinio mikroapdirbimo (gręžimo, pjūvių ar griovių formavimo ir pan.) metodai dažniausiai remiasi medžiagos pašalinimu dėl lazerio impulso sutelktos energijos į poveikio zoną - abliavimu. Naudojant šiam tikslui femtosekundinius lazerius, gaunami itin švarūs kiaurymių ar pjūvių kraštai, praktiškai nėra medžiagos, kurios negalėtume apdirbti tokiais lazeriais. Tačiau abliavimas turi principinį trūkumą - šiuo metodu neįmanoma pašalinti medžiagos iš labai siaurų plyšių ar mažo skersmens kiaurymių dėl to, kad šalinama iš pjūvio dugno medžiaga kaupiasi ant sienelių aukščiau poveikio zonos palaipsniui uždengdama priėjimą šviesai. Šis trūkumas apeinamas, naudojant atidalinimą skaldant, kai lazerio impulsu sukuriama pažaidos išilgai norimos atidalinimo linijos. Tačiau šis būdas veikia labai ribotai tuo atveju, kai ruošinį reikia sudalinti pagal didelio kreivumo linijas, o ypač, kai reikia pragręžti kiaurymes. Uždavinys dar labiau sudėtingėja, kai ruošinys yra pagamintas iš stiklo, ypač, jei tas stiklas grūdintas. Stiklai pastaruoju metu užima vis didesnę dalį tarp medžiagų, naudojamų puslaidininkinių technologijose (kaip pagrindai puslaidininkinėse struktūrose), mikroelektromechaninių sistemų gamyboje, mikrofluidinių prietaisų gamyboje. Visose šiose srityse reikalinga galimybė sukurti pjūvius, kiaurymes ar kanalus, turinčius bet kokią formą. Lazeriniai metodai pastaruoju metu pradėti kombinuoti su cheminiu ėsdinimu, kuris žymiai praplečia jų galimybes.

Žinomi analogai naudoja lazeriu paveiktos medžiagos ėsdinimą rūgštimis ar šarmais. US20180029924A1 aprašo būdą, kur ultravioletiniu lazeriu pragręžtos skylės yra ėsdinamos HF rūgštimi, naudojant savybę, kad lazeriu paveikta medžiaga yra ėsdinama sparčiau už nepaveiktą. Šiuo būdu gaunamos kiaurymės yra nevienodo skersmens per ruošinio storį (dažniausiai smėlio laikrodžio formos), ėsdinimo metų kiaurymės plečiasi į visas puses vienodai, dėl ko ėsdinant visą pjūvio

liniją, pjūvis gaunamas pločio, apytiksliai lygaus žingsniui tarp kiaurymių.

US2018037489 siūlomas būdas taip pat nepasižymi kryptingumu, lazeriu pramuštos kiaurymės jas ėsdinant tolygiai plečiasi į visas puses. Būdas skirtas ne pjūvių ar griovių darymui, bet tik apskritoms kiaurymėms.

US9517963B2 aprašytas būdas naudoja tolygų lazerių pramuštų kiaurymių didinimą ėsdinimu. Šiame būde stiklo pramušimui naudojamas nedifraguojantis Besselio pluoštas, kuris yra centrosimetrinis, todėl kiaurymės yra apskritos ir nepasižymi kryptingumu. Būdas nesiūlo galimybės išėsdinti tolygų pjūvį, jis tik palengvina ruošinio laužimą išilgai linijos, jungiančios kiaurymes. Naudojant aprašytą būdą, gaunamos žymios nuožulos kiaurymių įėjimo bei išėjimo iš ruošinio vietose, t.y., kiaurymės stipriai nukrypsta nuo cilindro formos, dėl ko pjūvis irgi yra su netaisyklingos formos nuožulomis. Taip pat, pramušant lazeriu kiaurymes, aplink jas susiformuoja neprognozuojamos formos mikroįtrūkimai, kuriais plisdama ėsdinanti stiklą rūgštis didina kiaurymę, mažindama lūžio lygumą, kuris nėra vienodas išilgai atidalinimo linijos dėl įtrūkimų atsitiktinio pobūdžio.

EP3102358A4 aprašytas būdas naudoja Lazeriu pramuštų kiaurymių ėsdinimą, jas padidinant ir turint tikslą kiaurymes panaudoti stiklo skėlimui išilgai kiaurymių sudaryto kontūro. Ėsdinimo proceso kryptingumo nesiekama ir jis nėra valdomas, kiaurymės nėra jungiamos.

US20160152508A1 aprašytas būdas stikliniams ruošiniams atidalinti per lazeriu prašautų ir ėsdinimu padidintų kiaurymių linijas. Ėsdinimo proceso kryptingumo nesiekama ir jis nėra valdomas, kiaurymės nėra jungiamos.

Naudojant aukščiau aprašytus kombinuotus lazerinio ir cheminio apdirbimo būdus, pakankamai storuose stikluose galima išpjauti kiaurymes, pasiekiant stiklo storio santykį su kiaurymės skersmeniu lygų 20-30 ir daugiau. Pagrindinė jų problema yra ta, kad, ėsdinant paveiktą stiklą agresyviomis rūgštimis ar jų mišiniais, tokiais, kaip HF, BHF, HF+HNO₃, gaunamų kiaurymių forma žymai nukrypsta nuo cilindro (pvz., „smėlio laikrodžio“ forma), jų briaunos irgi nėra stačios, o su žymia nuožula, siekiančia 5-10% nuo skersmens. Daugeliui taikymų tai nėra priimtina. Ėsdinant paveiktą stiklą šarmais, pvz., NaOH, KOH, kiaurymių geometrija yra žymiai tikslesnė, negu naudojant rūgštis, bet pats procesas yra gana lėtas, mikrometrų eilės tarpo praėsdinimui reikalaujantis keliolikos valandų.

Sprendžiama techninė problema

Išradimu siekiama pagerinti skaidrių medžiagų apdorojimo kokybę skaldant ar pjaunant skaidrias medžiagas, kartu pagerinant apdorojimo tikslumą.

Išradimo esmės atskleidimas

Uždavinio sprendimo esmė pagal pasiūlytą išradimą yra ta, kad skaidrių medžiagų apdirbimo būde, suformuojant apdirbamo ruošinio medžiagoje pjūvio arba skėlimo paviršių, turinčiame dvi apdirbimo stadijas:

A stadijoje vykdo pjūvio arba skėlimo paviršiaus formavimą lazeriu, nevisiškai atskiriant ruošinio dalis viena nuo kitos, kur A stadija apima šiuos etapus:

A.1 - koherentinių ultratrumpų impulsų lazerinės spinduliuotės TEM_{00} modos pluošto generavimą lazeriu,

A.2 - generuojamo lazerinės spinduliuotės pluošto nukreipimą į optinę sistemą, kuri suformuoja užduotą lazerinės spinduliuotės pluošto impulso skersmenį, bendrą impulso energiją, ir šviesos poliarizaciją,

A.3 - suformuoto lazerinės spinduliuotės pluošto etape A2 nukreipimą į optinį elementą, kuris įeinantį lazerinės spinduliuotės pluoštą transformuoja pagal užduotą dėsnį,

A.4 - suformuoto lazerinės spinduliuotės pluošto lokalizavimą ruošinyje, kurio medžiaga yra žymia dalimi skaidri lazerinės spinduliuotės pluoštui, o užduoti lazerinės spinduliuotės impulso parametrai užtikrina apdirbamo ruošinio židinio srityje lazerinės spinduliuotės energijos tankį, pakankamą pakeisti apdirbamos ruošinio medžiagos savybes,

A.5 - apdirbamo ruošinio valdomą perkėlimą atžvilgiu lazerinės spinduliuotės pluošto taip, kad atitinkamai persikelia lazerio spinduliuotės pluošto fokusavimo židiny minėtame ruošinyje sukuriant reikiamą skaičių pažaidos sričių ir suformuojant ruošinyje norimos trajektorijos pjūvio ir (arba) skėlimo paviršių,

B stadijoje vykdo visišką ruošinio dalių atskyrimą viena nuo kitos pagal suformuotą stadijoje A pjūvio ir (arba) skėlimo paviršiaus trajektoriją, patalpinant ruošinį į cheminę terpę, ėsdinančią pažaidos srityje ruošinio medžiagą, kur

etape A.3 lazerinės spinduliuotės pluošto transformavimas pagal užsiduotą

dėsnį vyksta optiniame elemente, kuriame suformuota dvejetainė struktūra, tolygiai keičianti statmenai į jį krentančios lazerinės spinduliuotės pluošto Pancharatnam'o-Berry fazę (PBF), kur optiniame elemente (10) yra suformuotos bent dvi minėtos struktūros sritys, su skirtingais PBF kitimo dėsniais ir jų orientacija krentančio į elementą lazerinės spinduliuotės pluošto atžvilgiu, kur minėtos bent dvi struktūros sritys suformuoja atitinkamai bent du subpluoštus su galimybe keisti subpluoštų energijos, fazės bei poliarizacijos skirstinį priklausomai nuo krentančios į optinį elementą (10) lazerinės spinduliuotės parametrų tokių, kaip poliarizacijos tipas toks kaip tiesinė arba apskritiminė arba radialinė arba azimutinė ir (arba) tiesinės poliarizacijos plokštumos orientacija pjūvio ar skėlimo trajektorijos elemente krypties atžvilgiu, kur

suformuoti minėti subpluoštai tarpusavyje interferuoja, gaunant suminį nedifraguojantį lazerinės spinduliuotės pluoštą, turintį užsiduotos energijos, fazės bei poliarizacijos židinio linijos necentrosimetrinį skirstinį, geriau pailgo pavidalo, plokštumoje, statmenoje lazerinės spinduliuotės pluošto sklidimo kryptiai, kur minėto skirstinio norimą pavidalą galima gauti, keičiant krentančios į optinį elementą (10) lazerinės spinduliuotės, suformuotos etape A.2, parametrus, kur nedifraguojančio lazerinės spinduliuotės pluošto necentrosimetrinis skirstinys turi statmenoje šviesos plitimo plokštumoje pagrindinį pailgą energijos maksimumą, kuriame sukaupta didžioji dalis impulso energijos su tankiu p , ir šalutinius energijos maksimumus, pailgus minėtoje plokštumoje, kuriuose energijos tankis yra tarp $p/6$ ir $p/3$,

gautą suminį lazerinės spinduliuotės pluoštą lokalizuoja ruošinyje, kur kiekvienas lazerinės spinduliuotės impulsas suformuoja pailgo pavidalo bendrą pažaidos sritį, sudarytą iš fizinių pokyčių, sudarytų iš ertmių ir (arba) įskilimų dėl minėto pagrindinio energijos maksimumo poveikio ir cheminių ruošinio medžiagos pokyčių dėl minėtų šalutinių energijos maksimumų poveikio, kur pažaidos bendras sritis ruošinyje orientuoja pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją pasukant elementą (10) apie jo ašį, o apdirbamą ruošinį valdomai perkelia taip, kad suformuotos pailgos pažaidos sritys dėl fizinių ruošinio medžiagos pokyčių išsidėsto išilgai viena po kitos su tarpais pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją, o etapuose A4 ir A5 lazerio impulsų energiją ir galią bei ruošinio judėjimo greitį parenka taip, kad pažaidos sritys dėl cheminių ruošinio medžiagos pokyčių pratęsia pagal pjūvio trajektoriją pažaidos sritis susidariusias dėl fizinių pažaidos pokyčių tiek, kad gretimos bendros pažaidos

sritys susiliečia arba dalinai persikloja, o stadijoje B cheminė terpė veiktų ruošinio medžiagą vienu metu visoje pjūvio trajektorijoje.

Suformuotos pailgos bendros pažaidos sritys yra eliptinio pavidalo plokštumoje, statmenoje šviesos plitimo kryptiai ir artutinais pastovaus dydžio, kintant ne daugiau, negu $\pm 15\%$ nuo vidutinės reikšmės išilgai minėtos krypties.

Pjūvio arba skėlimo paviršiaus trajektorija iš pailgų minėtų bendrų pažaidos sričių yra suformuojama, išdėstant išilgai pjūvio ar skėlimo paviršiaus trajektorijos daugiau negu vieną nedifraguojantį pluoštą atstumais, palyginamais su pluošto skersiniais matmenimis.

Pailgos pažaidos dėl fizinių ruošinio pokyčių ruošinyje yra išdėstomos su žingsniu, viršijančiu pažaidų plotį bent 1,5 kartų.

Ruošinys paeiliui talpinamas į kelis pasirinktinai chemiškai aktyvius skysčius, tokius kaip KOH, Na_2CO_3 , HF, HCl tirpalus, kad ruošinio pažaidų srityje susidarytų ir likę prieš tai joje vykusios cheminės reakcijos produktai būtų perkeliama ir ištirpinami kitame ruošinį veikiančiame tirpale.

Šio išradimo konstrukciniame išpildyme lazerinio medžiagų apdirbimo įrenginyje, apimančiame lazerį, generuojantį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės TEM_{00} modos pluoštą, nukreiptą į optinę sistemą, skirtą lazerinės spinduliuotės pluošto impulso energijai, šviesos poliarizacijai ir lazerinės spinduliuotės pluošto skersmeniui keisti, kur optinėje sistemoje suformuotas lazerinės spinduliuotės pluoštas per optinį elementą, skirtą įeinantį pluoštą transformuoti pagal užduotą dėsnį, lokalizuojamas apdirbamame ruošinyje, kur ruošinio medžiaga yra žymia dalimi skaidri lazerinės spinduliuotės pluoštui,

optinėje sistemoje suformuoti pasirinkti lazerinės spinduliuotės pluošto impulso parametrai užtikrina lazerinės spinduliuotės energijos tankį, pakankamą židinio srityje pakeisti apdirbamos ruošinio medžiagos savybes,

valdomą perkėlimo mechanizmą, skirtą apdirbamos medžiagos ruošiniui perkelti atžvilgiu lazerinės spinduliuotės pluošto taip, kad perkeliant lazerio spinduliuotės pluošto fokusavimo židinį minėtame ruošinyje sukuria reikiamą skaičių pažaidos sričių ir suformuoja ruošinyje norimos trajektorijos pjovimo ir/arba skėlimo paviršių,

indą su chemine terpe, ėsđinančia ruošinio medžiagą pažaidos srityje ir skirta ruošiniui joje patalpinti ir jo dalims atskirti vieną nuo kitos pagal suformuotą pjovimo ir/arba skėlimo paviršiaus trajektoriją, kur

lazerinės spinduliuotės kelyje už optinės sistemos esantis optinis elementas (10), skirtas įeinantį lazerinės spinduliuotės pluoštui transformuoti pagal užduotą dėsnį, turi dvejopalūžę struktūrą, tolygiai keičiančią statmenai į jį krentančios lazerinės spinduliuotės pluošto Pancharatnam'o-Berry fazę (PBF), kur ruošinyje yra bent dvi minėtos dvejopalūžės struktūros sritys su skirtingais PBF kitimo dėsniais ir jų orientacija krentančio į elementą pluošto atžvilgiu, kur minėtos struktūros sritys elemente suformuoja atitinkamai bent du interferuojančius subpluoštus, gaunant suminį nedifraguojantį lazerinės spinduliuotės pluoštą, turintį norimos energijos, fazės bei poliarizacijos necentrosimetrinį skirstinį, geriau pailgo pavidalo, plokštumoje, statmenoje lazerinės spinduliuotės pluošto sklidimo kryptčiai, ir turintį pagrindinį energijos maksimumą ir šalutinius energijos maksimumus, kur optinis elementas sumontuotas galinčiame pasisukti apie savo ašį tvirtinimo mechanizme, skirtame elemento, ir jame suformuotų dvejopalūžių struktūrų sričių padėčiai keisti, elemento suformuotas minėtas suminis nedifraguojantis lazerinės spinduliuotės pluoštas per fokusuojančią optiką lokalizuojamas apdirbamame ruošinyje, kur pasukant optinį elementą minėtu mechanizmu pakeičiama suformuotos pailgos pažaidos srities orientacija pagal pjovimo linijos trajektoriją, o valdomu perkėlimo mechanizmu ruošinį perkelia taip, kad suformuotos pailgo pavidalo bendros pažaidos sritys, sudarytos iš ruošinio medžiagos fizinių pokyčių ir cheminių ruošinio medžiagos pokyčių, išsidėsto išilgai viena po kitos pagal pjovimo ir/arba skėlimo trajektoriją taip, kad suformuotos pailgos pažaidos sritys dėl fizinių ruošinio medžiagos pokyčių išsidėsto išilgai viena po kitos su tarpais pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją, o pažaidos sritys dėl cheminių ruošinio medžiagos pokyčių pratęsia pagal pjūvio trajektoriją pažaidos sritis susidariusias dėl fizinių pažaidos pokyčių tiek, kad gretimos bendros pažaidos sritys susiliečia arba dalinai persikloja.

Išradimo naudingumas

Siūlomas lazerinis-cheminis stiklinių ruošinių apdirbimo būdas įgalina gauti tikslios geometrijos pjūvius ar kiaurymes per laiką 10 ir daugiau kartų trumpesnį, negu žinomi lazerio asistuoto cheminio ėsđinimo (Laser Assisted Chemical Etching - LACE) arba lazerio inicijuoto cheminio ėsđinimo (Laser Induced Chemical Etching -

LICE) būdai.

Siūlomas išradimas įgalina išsėdinti lazeriu suformuotą siaurą kryptingai sujungtų fizinių bei cheminių pažaidų liniją. Siūlomame išradime bendra pažaida susidaro ruošinio medžiagos struktūros pokyčių pagrindu, apimančių ertmių, saviorganizuojančių struktūrų, mechaninių įtempių susidarymą ir cheminius pokyčius, apimančius cheminių jungčių persiorganizavimą ar laisvų jungčių atsiradimą.

Siūlomame būde formuojamas pailgo skerspjūvio pluoštas didžiausio intensyvumo vietoje sukuria fizinę pažaidą (iki kiaurymės pramušimo), o išplitusi pjūvio linijos kryptimi mažesnio intensyvumo sritis pakeičia medžiagos chemines savybes. Taip susidariusi bendra pažaidos sritis pagerina apdorojimo tikslumą: pasiekiant pjūvio pločio santykį su gyliu iki 1:100, nenukrypstant nuo statmens daugiau, negu 2° ir išlaikant pjūvių nuožulas ne didesnes, negu $0,1 \mu\text{m}$. Išsėdinto pjūvio paviršiaus nelygumai neviršija $2 \mu\text{m}$, jų nuožulos neviršija $0,1 \mu\text{m}$, pjūviai neturi užvartų. Todėl šiuo būdu pagaminti gaminiai gali būti naudojami pritaikymuose, reikalaujančiuose didelio tikslumo bei statmenumo, tokiuose, kaip puslaidininkinių prietaisų testinių plokščių kreipiančiosios tarpinės, kas žymiai pailgina jų tarnybos laiką. Nuožulų bei užvartų nebuvimas leidžia naudoti gaminius sujungimui plokštumomis be papildomo poliravimo po cheminio apdirbimo, kas paspartina mikroelektromechaninių sistemų (MEMS) ir mikrofluidinių prietaisų gamybą.

Išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais, kurie neapriboja išradimo apimtys ir kuriuose pavaizduota:

Fig. 1 pavaizduota pasiūlyto skaidrių medžiagų apdirbimo įrenginio principinė blokinės schemos dalis, paaiškinanti lazerio pluošto suformavimą iki jo patekimo į formuojantį skirstinį optinį elementą.

Fig. 2 pavaizduota pasiūlyto skaidrių medžiagų lazerinio apdirbimo įrenginio principinės schemos dalis, kuri parodo, kaip suformuojamas norimas skirstinys ir kaip jis patalpinamas apdirbamame ruošinyje.

Fig. 3 pavaizduota dvejetainė struktūra, suformuotos pluoštą transformuojančiame elemente, koordinatės polinėje ir stačiakampėje koordinatinių sistemose.

Fig. 4 pavaizduotos sektoriais išdėstytos PBF kitimo sritys elemente.

Fig. 5 pavaizduotos koncentriškai išdėstytos PBF kitimo sritys elemente.

Fig. 6 pavaizduotas bendriausias PBF kitimo zonų išdėstymas elemente, kai skirtinguose sektoriuose PBF kitimas dar priklauso ir nuo dvejetainių struktūrų atstumo nuo elemento centro.

Fig. 7 pavaizduotas konkretus atvejis, kai PBF kitimas dviejuose 180° sektoriuose turi skirtingas priklausomybes nuo atstumo nuo centro.

Fig. 8 pavaizduotas išmatuotas skersinis energijos skirstinys, sukurtas elementu iš Fig. 7.

Fig. 9 pavaizduotas Fig. 8 skirstinio energijos kitimas išilgai šviesos sklaidimo krypties.

Fig. 10 pavaizduota valdomos krypties pažaidų linija, gauta sukant elementą aplink šviesos pluošto ašį.

Fig. 11 pavaizduotos pažaidos toje linijoje, kuriose išskirti fizinių (pramušimas) ir cheminių (jungčių persiskirstymas) pažaidų laukai.

Fig. 12 pavaizduota bendriausio pavidalo žemės šarminio aliumosilikatinio stiklo struktūra.

Fig. 13 pavaizduotas atominės jėgos mikroskopu (AFM) išmatuotas pjūvio krašto profilis.

Išradimo realizavimo pavyzdys

Pasiūlytas skaidrių medžiagų apdirbimo būdas apima šią operacijų seką:

Skaidrių medžiagų apdirbimo būdas apima dvi apdirbimo stadijas:

A stadijoje vykdo pjūvio arba skėlimo paviršiaus formavimą lazeriu, nevysiškai atskiriant ruošinio dalis viena nuo kitos. A stadija apima šiuos etapus: A.1 - lazeriu generuoja koherentinį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės TEM_{00} modos pluoštą. A.2 - generuojamo lazerinės spinduliuotės pluoštą nukreipia į optinę sistemą, kuri suformuoja užduotą lazerinės spinduliuotės pluošto impulso skersmenį, bendrą impulso energiją, ir šviesos poliarizaciją. A.3 - lazerinės spinduliuotės pluoštą, suformuotą etape A2 nukreipia į optinį elementą, kuris lazerinės spinduliuotės pluoštą transformuoja pagal užsiduotą dėsnį. Šis transformavimas vyksta optiniame elemente, kuriame yra suformuota dvejetainė struktūra, tolygiai keičianti statmenai į

jį krentančios lazerinės spinduliuotės pluošto Pancharatnam'o-Berry fazę (PBF). Minėtame optiniame elemente yra suformuotos bent dvi minėtos struktūros sritys, su skirtingais PBF kitimo dėsniais ir jų orientacija krentančio į elementą pluošto atžvilgiu. Minėtos bent dvi struktūros sritys suformuoja atitinkamai bent du subpluoštus su galimybe keisti subpluoštų energijos, fazės bei poliarizacijos skirstinį priklausomai nuo krentančios į minėtą optinį elementą šviesos parametrų tokių, kaip poliarizacijos tipas toks kaip tiesinė arba apskritiminė arba radialinė arba azimutinė ir (arba) tiesinės poliarizacijos plokštumos orientacija pjūvio ar skėlimo trajektorijos elemente krypties atžvilgiu.

Suformuoti minėti subpluoštai tarpusavyje interferuoja, gaunant suminį nedifraguojantį lazerinės spinduliuotės pluoštą, turintį užsiduotos energijos, fazės bei poliarizacijos židinio linijos necentrosimetrinį skirstinį, geriau pailgo pavidalo, plokštumoje, statmenoje lazerinės spinduliuotės pluošto sklidimo kryptiai, kur minėto skirstinio norimą pavidalą galima gauti, keičiant krintančios į minėtą optinį elementą lazerinės spinduliuotės, suformuotos etape A.2, parametrus. A.4 etape gautą suminį lazerinės spinduliuotės pluoštą lokalizuoja ruošinyje, kur kiekvienas lazerinės spinduliuotės impulsas suformuoja pailgo pavidalo bendrą pažaidos sritį, sudarytą iš fizinių ir cheminių ruošinio medžiagos pokyčių. Ruošinio medžiaga, kuriame lokalizuoja lazerinės spinduliuotės pluoštą yra žymia dalimi skaidri lazerinės spinduliuotės pluoštui, o užduoti lazerinės spinduliuotės impulso parametrai užtikrina apdirbamo ruošinio židinio srityje lazerinės spinduliuotės energijos tankį, pakankamą pakeisti apdirbamos ruošinio medžiagos savybes. A5 etape bendras pažaidos sritis ruošinyje orientuoja pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją pasukant minėtą optinį elementą apie jo ašį, o apdirbamą ruošinį valdomai perkelia taip, kad suformuotos pailgos pažaidos sritys dėl fizinių ruošinio medžiagos pokyčių išsidėsto išilgai viena po kitos su tarpais pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją. Lazerio impulsų energiją ir galią bei ruošinio judėjimo greitį parenka taip, kad pažaidos sritys susidariusios dėl cheminių ruošinio medžiagos pokyčių pratęsia pagal pjūvio trajektoriją pažaidos sritis susidariusias dėl fizinių pažaidos pokyčių tiek, kad gretimos bendros pažaidos sritys susilieja arba persikloja. Suformuotos pailgos bendros pažaidos sritys geriau yra eliptinio pavidalo plokštumoje, statmenoje šviesos plitimo kryptiai ir artutinai pastovaus dydžio, kintant ne daugiau, negu $\pm 15\%$ nuo vidutinės reikšmės išilgai minėtos krypties. Pjūvio arba skėlimo paviršiaus trajektorija iš pailgų minėtų bendrų

pažaidos sričių yra suformuojama, išdėstant išilgai pjūvio ar skėlimo paviršiaus trajektorijos daugiau negu vieną nedifraguojantį pluoštą atstumais, palyginamais su pluošto skersiniais matmenimis. Pailgos pažaidos dėl fizinių ruošinio pokyčių ruošinyje yra išdėstomos su žingsniu, viršijančiu pažaidų plotį bent 1,5 kartų.

Toliau B stadijoje vykdo visišką ruošinio dalių atskyrimą viena nuo kitos pagal suformuotą stadijoje A pjūvio ir (arba) skėlimo paviršiaus trajektoriją, tam ruošinį patalpina į cheminę terpę, esdinančią pažaidos srityje ruošinio medžiagą. Kadangi pagal pjūvio ar skėlimo trajektoriją susidariusios bendros pažaidos sritys tarpusavyje liečiasi arba persikloja tai cheminė terpė veikia ruošinio medžiagą vienu metu visoje pjūvio arba skėlimo paviršiaus trajektorijoje ir šioje trajektorijoje paveiktą ruošinio medžiagą cheminė terpė tirpina žymiai sparčiau negu nepaveiktą ruošinio dalį. Palaikius ruošinį tirpale tinkamą laiką, reagentas ištirpina ruošinio medžiagą išilgai pjūvio linijos, mažai ją išplėsdamas statmena linijai kryptimi ir ruošinio dalys atidalinamos viena nuo kitos. Cheminė terpė į kurią talpinamas ruošinys po apdirbimo lazerio spinduliuotės pluoštu A etape gali būti KOH tirpalas, bet geriau kai ruošinys paeiliui talpinamas į kelis pasirinktinai chemiškai aktyvius skysčius, tokius kaip KOH, Na_2CO_3 , HF, HCl tirpalus. Ruošinį išėmus iš vieno cheminės terpės tirpalo jį patalpina į kitą cheminės terpės tirpalą, kuris ištirpina ruošinio pažaidų srityje susidariusius ir likusius prieš tai vykusios cheminės reakcijos produktus. Taip ruošinys talpinamas vis į kitą cheminės terpės tirpalą, kol ruošinio dalys viena nuo kitos atsiskiria labai tiksliai be jokių skersinių įskilimų.

Skaidyti skaidrias medžiagas siūlomu būdu naudojamas lazeris 1, (Fig. 1) sukuriama TEM_{00} modos ultra trumpi (100 fs - 10 ps trukmės) šviesos impulsai, turintys energijos skirstinį skerspjuvyje 2, aprašomą Gauso formule

$$I(r) = I(0) \exp(-2r^2/\omega_0^2) \quad [1]$$

Kur $I(r)$ yra šviesos intensyvumas pluošto taške, nutolusiame per r nuo pluošto ašies, $I(0)$ yra šviesos intensyvumas pluošto ašyje, ω_0 yra atstumas nuo ašies iki taško, kuriame $I(r)=I(0)/e$.

Šviesos intensyvumas pluošte reguliuojamas derinamu atenuatoriumi 3, kurį sudaro pusbangė plokštelė 4 ir poliarizatorius 5, kurio poliarizacijos plokštuma yra suderinta praleisti visą iš lazerio ateinančią šviesą, nesant kelyje plokštelės 4. Sukant plokštelės lėtosios ašies kryptį lazerio šviesos poliarizacijos plokštumos atžvilgiu,

atitinkamai pasukama praėjusios plokštelę šviesos poliarizacijos kryptis, ir, poliarizatoriui 5 praleidžiant tik šviesos dedamąją, lygiagrečią iš lazerio išeinančios šviesos poliarizacijai, galima praleisti nuo 0% iki 100% iš lazerio ateinančios šviesos, priklausomai nuo plokštelės 3 posūkio kampo.

Praėjusio atenuatorių šviesos pluošto skersmuo yra užduodamas paderinamu plėstuvu 6, kurį sudaro neigiamų 7 ir teigiamų 8 lęšių rinkinys. Derinant atstumą tarp lęšių, pasiekiamas reikalingas išeinančio iš plėstuvo pluošto skersmuo.

Tuo atveju, jei reikalinga suteikti šviesos pluoštui elipsinę poliarizaciją, jo kelyje patalpinama ketvirčio bangos plokštelė 9, kurios lėtosios ašies kampas su krentančios šviesos poliarizacijos plokštuma užduoda elipsiškumo laipsnį ir apskritiminės poliarizacijos sukimosi kryptį (kairinę ar dešininę).

Lazerio šviesos pluošto kelyje patalpinamas optinis elementas 10, pagamintas iš plokščio skaidrios medžiagos ruošinio, kuriame suformuojama šviesos Pancharatnam'o-Berry fazę (PBF) keičianti struktūra.

Lazerio pluošto diametras parenkamas taip, kad pluoštas visiškai užpildytų darbinį pluošto formavimo elemento plotą. Tai reiškia, kad šviesos intensyvumas atstumu R_E nuo pluošto ašies turi būti ne didesnis, negu $(R_E) \leq I(0)/e^2$, kitaip tariant, elemento spindulys turi būti ne mažesnis, negu dvigubas Gauso pluošto spindulys [1] formulėje, t.y.,

$$R_E \geq 2 \omega_0 \quad [2]$$

Lazerio pluošte 11 patalpinus pluoštą formuojantį elementą 10 su PBF, kintančia jo skerspjūvyje, skirtingose elemento vietose pagal užduotą dėsnį pasukama poliarizacijos plokštuma ir įnešamas reikalingo dydžio fazės vėlinimas. Elementas tvirtinamas posūkio mechanizme 12, kas įgalina keisti elemento, o tuo pačiu jame įrašytų struktūrų padėtį krentančios į elementą poliarizacijos plokštumos atžvilgiu. Šviesos pluošteliai 13, plintantys iš įvairių elemento vietų, interferuoja tarpusavyje tiek konstruktyviai, tiek destruktiviai, kas leidžia suformuoti norimus energijos, fazės bei poliarizacijos skirstinius 14. Suformuotas skirstinys per fokusuojančią optiką (15,16,17) pavidalu 18 perkeliamas į ruošinį 19. Bent dalis fokusuojančios optikos sudaro 4f schemą, kuri naudojama tam, kad būtų galima Fourier plokštumoje 16 pridėti papildomą amplitudės funkciją, pvz., nufiltruoti nepageidaujamus amplitudinio spektro elementus, tuo pačiu suformuojant reikiamą

skirstinį židinio linijoje. Židinio srities vieta Z ašyje nustatoma aukščio paderinimo mechanizmu (20), o pats ruošinys gali būti judinamas pozicionavimo mechanizmu (21) X-Y plokštumoje.

Elemente (10) yra suformuotos viena ar daugiau zonų, kiekvienoje iš kurių Pancharatnam'o-Berry fazė (PBF) sklandžiai kinta pagal tai zonai užduotą taisyklę.

Kiekviename skerspjūvio taške PBF reikšmė yra užduodama ruošinio tūryje suformuota periodine nanoplokštelių struktūra 23, (Fig.3), kurios orientacija elemente yra aprašoma priklausomybe stačiakampėse koordinatėse

$$\vartheta_i = f_i(x_i, y_i) \quad [3]$$

Kur ϑ_i yra periodinės struktūros posūkio i koordinačių ašį kampas i -toje zonoje, aprašomas funkcija f_i

arba polinėse koordinatėse:

$$\vartheta_i = f_i(r_i, \varphi_i) \quad [4]$$

čia $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ ir φ_i yra tos periodinės struktūros polinės koordinatės elemento skerspjūvyje.

Norint gauti skirstinius su ašine simetrija (apskritimine ar elipsine), šios zonos gali būti išdėstytos tiek sektoriais (Fig.4)

$$\vartheta_i = f_i(0 \leq r_i \leq R_E, \varphi_{min,i} \leq \varphi_i < \varphi_{max,i}) \quad [5]$$

Kur R_E yra elemento spindulys, $\varphi_{min,i}, \varphi_{max,i}$ yra sektoriaus pradžios ir pabaigos kampas polinėse koordinatėse.

Tiek koncentraciniais žiedais (Fig.5)

$$\vartheta_i = f_i(0 \leq r_i \leq R_E, \varphi_{min,i} \leq \varphi_i < \varphi_{max,i}) \quad [6]$$

Kur $r_{min,i}, r_{max,i}$ yra žiedo pradžios ir pabaigos spindulių reikšmės

Tiek žiedais, sudalintais į sektorius (Fig.6)

$$\vartheta_i = f_i(r_{min,i} \leq r_i < r_{max,i}, \varphi_{min,i} \leq \varphi_i < \varphi_{max,i}) \quad [7]$$

Atskiru konkrečiu atveju, elemente suformuojamos dvi zonos sektoriais

$0 < \varphi_1 \leq \pi$ ir $\pi < \varphi_2 \leq 2\pi$, kiekviename iš sektorių PBF kitimą formuojant žiedais, kiekviename iš kurių PBF kitimas aprašomas funkcija, būdinga tik tam žiedui (Fig.7):

$$\vartheta_{ij,\varphi_n} = f_{ij}(r_{ij}, \varphi_n) \quad [8]$$

Kur ϑ_{ij,φ_n} yra PBF orientacijos kampas n -tame sektoriuje ir žiede i arba j , kur i ir j yra žiedo numeris atitinkamai 1-me arba 2-me sektoriuje (Fig.7).

Parinkus funkcijas taip, kad

$$\vartheta_{i,\varphi_1} = f_i(r_i, \varphi_1) = \sin(r_i * \pi / 180) * a \quad [9]$$

ir

$$\vartheta_{j,\varphi_2} = f_j(r_j, \varphi_2) = \sin((r_j * \pi / 180 + \pi) * a) \quad [10]$$

kur r_i yra elemento spindulys, a yra koeficientas, apsprendžiantis supluoštų susigaudymo kampą

PBF elementas formuoja nedifraguojantį pluoštą.

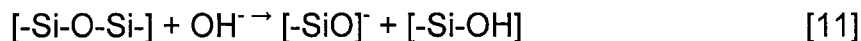
Lazerio šviesos pluošte patalpinus elementą 10, aprašomą [9] ir [10] funkcijomis, už elemento susiformuoja eliptinės simetrijos skirstinys (Fig. 8), turintis vieną ar kelis maksimumus šviesos plitimo kryptimi (Fig.9). Intensyvumo pasiskirstymą tarp maksimumų užduoda šviesos, krentančios į elementą, poliarizacijos pobūdis (tiesinė, apskritiminė ar elipsinė). Skirstinyje suformuojamas pagrindinis maksimumas 24, kuriame sutelkiama didžioji dalis pluošto energijos, o aplink jį suformuojami taip pat eliptiški šalutiniai maksimumai 25. Skirstinio elipsės ilgosios ašies 26 (Fig. 8) kryptis priklauso nuo elemento sektorių orientacijos plokštumoje, statmenoje šviesos plitimo kryptčiai.

Sufokusavus elemento sukurtą skirstinį stikle ir impulso galios tankiui viršijant ribą p_{rib} , kurios reikšmė priklauso nuo stiklo sandaros, stiklo tūryje susidaro tuštuminės pažaidos, kurių forma atkartoja intensyvumo skirstinį židinio srityje. Pavyzdžiui, stiklui borosilikatiniuose stikluose su didele (~6-10%) žemės šarminių elementų koncentracija $p_{rib} \approx 1 \times 10^{15} \text{ Wcm}^{-3}$, kai stikluose be žemės šarminių elementų ta riba yra $p_{rib} \approx 5 \times 10^{14} \text{ Wcm}^{-3}$. Energijos skirstinys suformuojamas tokio pavidalo, kad p_{rib} būtų viršijamas tik pagrindiniame maksimume 24.

Perkeliant stiklo ruošinį (19) X-Y plokštumoje, statmenoje šviesos sklaidimo kryptčiai, ir tuo pačiu metu keičiant skirstinio elipsės ilgosios ašies padėtį posūkio mechanizmu 12, eliptinės pažaidos 27 išdėstomos išilgai norimos pjūvio linijos 28. Šalutinių maksimumų 25, persiklojančių nuo gretutinių impulsų, galios tankiui p viršijus skėlimo susidarymo slenkstį $p_{sk} = p_{rib}/6 + p_{rib}/3$, būdingą tam konkrečiam stiklui, fizines pažaidas sujungia susidarę cheminiai pokyčiai 29 (Fig. 10), sąlygojantys ir fizinių įtempių atsiradimą.

Aplinkui pažaidas susidaro sritys (30, Fig.11), kuriose yra pakeistos fizikocheminės stiklų savybės. Stiklas yra oksidinių struktūrų tinklas, kuriame yra įmaišyti šarminių ir/arba žemės šarminių metalų katijonai. Atskiru atveju, aliumosilikatinį stiklą su aliuminio kiekiu $Al / Si \geq 1/3$ (12 Fig.) sudaro deguonies atomų tetraedrai su silicio (31) arba aliuminio (32) atomais centre. Dalies tų tetraedrų viršūnės sukabina rišančiojo deguonies (Bridging Oxygen - BO) tilteliai, skiriami pagal ryšio tipą į BO1 (33), rišančius Si-O-Si tetraedrus ir BO2 (34), rišančius Si-O-Al tetraedrus. Laisvi kampuose esantys deguonies atomai vadinami nerišančiu deguonimi (Non Bridging Oxygen - NBO) (35). Tarp šių gana tvarkingų struktūrų gana laisvai įsiterpia šarminių (ŠM, 36) ir žemės šarminių (ŽM, 37) metalų katijonai, kurių buvimas įtakoja deguonies tiltelių susidarymą ir BO1/BO2 tiltelių kiekių santykį. Yra žinoma, kad, esant atomų kiekių $\text{ŠM}/Al \approx 1$ skirtingų tipų tiltelių kiekio santykis $BO2/BO1 \approx 3$, $NBO/BO2 = 0$, tuo tarpu stikluose su $\text{ŠM}/Al \approx 0,2$ tas santykis $BO2/BO1 \approx 0,3$, taip pat stebimos ir nerišančiojo deguonies jungtys $NBO/(BO1+BO2) \approx 0,1$

Veikiant lazerio impulsu tokius stiklus, stebimas žymus santykio BO/NBO pasikeitimas. Nustatyta, kad daugelyje stiklų lazerio impulso energijos tankiui viršijus $2 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, santykis pasiekia $BO/NBO \approx 0,3$, t.y., BO tiltelių sumažėja daugiau, negu ~3 kartus, lyginant su lazerio nepaveiktu stiklu. Stiklą veikiant lazerio šviesai, nutrūksta BO tipo tilteliai ir susidaro deguonies deficito centrai (Oxygen Deficiency Center, ODC) su silicio ar aliuminio pertekliumi ($ODC \text{ I} \equiv Si-Si \equiv$ ir $\equiv Al-Al \equiv$ arba su laisvomis jungtimis ($ODC \text{ II} \equiv Si^0$ ir $\equiv Al^0$). Taip pat struktūroje susidaro nerišančiojo deguonies skylių centrai (Non Bridging Oxygen Hole Centers - NBOHC) kaip $\equiv Si-O^\circ$ arba $\equiv Al-O^\circ$. Visi šie defektai yra žymiai chemiškai aktyvesni už lazeriu nepaveiktą stiklą, todėl, patalpinus paveiktą ruošinį į šarmo tirpalą, hidroksilo anijonai reaguoja su atsivėrusiomis jungtimis, sudarydami tirpius darinius kaip:



Tinklą modifikuojančių žemės šarminių metalų (Ca, Mg, Ba, Zn) oksidai, kurie susidaro, susijungiant metalams su atsilaisvinusiu deguonimi, tiesiogiai nereaguoja su šarmais, bet yra tirpūs juose. Tuo tarpu šarminiai metalai (Li, Na, K) pereina į tirpalą hidroksidų pavidalu.

Dėka išvardintų procesų, šalutinių impulso maksimumų paveikta stiklo sritis yra tirpinama šarme iki 1000 kartų greičiau, negu nepaveikta. Tai reiškia, kad, suformavus norimo pjūvio linijoje sritį su dideliu laisvų deguonies ar aktyvių silicio ir aliuminio jungčių kiekiu, šarmas ištirpina praktiškai tik pjūvio sritį, nepaliesdamas ruošinio medžiagos, kurios nereikia pašalinti. To dėka gaunami itin didelio tikslumo pjūviai. Kaip matyti iš Fig. 13, ant pjūvio krašto susiformuoja tik 0,05-0,1 μm (50-100 nm) dydžio nuožula.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Skaidrių medžiagų apdirbimo būdas, suformuojant apdirbamo ruošinio medžiagoje pjūvio arba skėlimo paviršių, turintis dvi apdirbimo stadijas:

A stadijoje vykdo pjūvio arba skėlimo paviršiaus formavimą lazeriu, nevysiškai atskiriant ruošinio dalis viena nuo kitos, kur A stadija apima šiuos etapus:

A.1 koherentinių ultratrumpų impulsų lazerinės spinduliuotės TEM_{00} modos pluošto generavimą lazeriu,

A.2 generuojamo lazerinės spinduliuotės pluošto nukreipimą į optinę sistemą, kuri suformuoja užduotą lazerinės spinduliuotės pluošto impulso skersmenį, bendrą impulso energiją, ir šviesos poliarizaciją,

A.3 suformuoto lazerinės spinduliuotės pluošto etape A2 nukreipimą į optinį elementą, kuris įeinantį lazerinės spinduliuotės pluoštą transformuoja pagal užduotą dėsnį,

A.4 suformuoto lazerinės spinduliuotės pluošto lokalizavimą ruošinyje, kurio medžiaga yra žymia dalimi skaidri lazerinės spinduliuotės pluoštui, o užduoti lazerinės spinduliuotės impulso parametrai užtikrina apdirbamo ruošinio židinio srityje lazerinės spinduliuotės energijos tankį, pakankamą pakeisti apdirbamos ruošinio medžiagos savybes,

A.5 apdirbamo ruošinio valdomą perkėlimą atžvilgiu lazerinės spinduliuotės pluošto taip, kad atitinkamai persikelia lazerio spinduliuotės pluošto fokusavimo židiny minėtame ruošinyje sukuriant reikiamą skaičių pažaidos sričių ir suformuojant ruošinyje norimos trajektorijos pjūvio ir (arba) skėlimo paviršių,

B stadijoje vykdo visišką ruošinio dalių atskyrimą viena nuo kitos pagal suformuotą stadijoje A pjūvio ir (arba) skėlimo paviršiaus trajektoriją, patalpinant ruošinį į cheminę terpę, esdinančią pažaidos srityje ruošinio medžiagą,

b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

etape A.3 lazerinės spinduliuotės pluošto transformavimas pagal užsiduotą dėsnį vyksta optiniame elemente (10), kuriame suformuota dvejetainė struktūra, tolygiai keičianti statmenai į jį krentančios lazerinės spinduliuotės pluošto Pancharatnam'o-Berry fazę (PBF), kur optiniame elemente (10) yra suformuotos bent dvi minėtos struktūros sritys, su skirtingais PBF kitimo dėsniais ir jų orientacija

krentančio į elementą lazerinės spinduliuotės pluošto atžvilgiu, kur minėtos bent dvi struktūros sritys suformuoja atitinkamai bent du subpluoštus su galimybe keisti subpluoštų energijos, fazės bei poliarizacijos skirstinį priklausomai nuo krentančios į optinį elementą (10) lazerinės spinduliuotės parametrų tokių, kaip poliarizacijos tipas toks kaip tiesinė arba apskritiminė arba radialinė arba azimutinė ir (arba) tiesinės poliarizacijos plokštumos orientacija pjūvio ar skėlimo trajektorijos elemente krypties atžvilgiu, kur

suformuoti minėti subpluoštai tarpusavyje interferuoja, gaunant suminį nedifraguojantį lazerinės spinduliuotės pluoštą, turintį užsiduotos energijos, fazės bei poliarizacijos židinio linijos necentrosimetrinį skirstinį, geriau pailgo pavidalo, plokštumoje, statmenoje lazerinės spinduliuotės pluošto sklidimo kryptčiai, kur minėto skirstinio norimą pavidalą galima gauti, keičiant krintančios į optinį elementą (10) lazerinės spinduliuotės, suformuotos etape A.2, parametrus, kur nedifraguojančio lazerinės spinduliuotės pluošto necentrosimetrinis skirstinys turi statmenoje šviesos plitimo plokštumoje pagrindinį pailgą energijos maksimumą, kuriame sukaupia didžioji dalis impulso energijos su tankiu p , ir šalutinius energijos maksimumus, pailgus minėtoje plokštumoje, kuriuose energijos tankis yra tarp $p/6$ ir $p/3$,

gautą suminį lazerinės spinduliuotės pluoštą lokalizuoja ruošinyje, kur kiekvienas lazerinės spinduliuotės impulsas suformuoja pailgo pavidalo bendrą pažaidos sritį, sudarytą iš fizinių pokyčių, sudarytų iš ertmių ir (arba) įskilimų dėl minėto pagrindinio energijos maksimumo poveikio ir cheminių ruošinio medžiagos pokyčių dėl minėtų šalutinių energijos maksimumų poveikio, kur pažaidos bendras sritis ruošinyje orientuoja pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją pasukant elementą (10) apie jo ašį, o apdirbamą ruošinį valdomai perkelia taip, kad suformuotos pailgos pažaidos sritys dėl fizinių ruošinio medžiagos pokyčių išsidėsto išilgai viena po kitos su tarpais pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją, o etapuose A4 ir A5 lazerio impulsų energiją ir galią bei ruošinio judėjimo greitį parenka taip, kad pažaidos sritys dėl cheminių ruošinio medžiagos pokyčių pratęsia pagal pjūvio trajektoriją pažaidos sritis susidariusias dėl fizinių pažaidos pokyčių tiek, kad gretimos bendros pažaidos sritys susiliečia arba dalinai persikloja, o stadijoje B cheminė terpė veiktų ruošinio medžiagą vienu metu visoje pjūvio trajektorijoje.

2. Būdas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad suformuotos pailgos bendros pažaidos sritys yra eliptinio pavidalo plokštumoje, statmenoje šviesos plitimo

krypčiai ir artutiniai pastovaus dydžio, kintant ne daugiau, negu $\pm 15\%$ nuo vidutinės reikšmės išilgai minėtos krypties.

3. Būdas pagal 1 arba 2 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo kad pjūvio arba skėlimo paviršiaus trajektorija iš pailgų minėtų bendrų pažaidos sričių yra suformuojama, išdėstant išilgai pjūvio ar skėlimo paviršiaus trajektorijos daugiau negu vieną nedifraguojantį pluoštą atstumais, palyginamais su pluošto skersiniais matmenimis.

4. Būdas pagal 1, 2 arba 3 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pailgos pažaidos dėl fizinių ruošinio pokyčių ruošinyje yra išdėstomos su žingsniu, viršijančiu pažaidų plotį bent 1,5 kartų.

5. Būdas pagal 1-4 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad ruošinys paeiliui talpinamas į kelis pasirinktinai chemiškai aktyvius skysčius, tokius kaip KOH, Na_2CO_3 , HF, HCl tirpalus, kad ruošinio pažaidų srityje susidarytų ir likę prieš tai joje vykusios cheminės reakcijos produktai būtų perkeliami ir ištirpinami kitame ruošinį veikiančiame tirpale.

6. Lazerinis medžiagų apdirbimo įrenginys, apimantis lazerį (1), generuojantį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės TEM_{00} modos pluoštą (2), nukreiptą į optinę sistemą, skirtą lazerinės spinduliuotės pluošto impulso energijai, šviesos poliarizacijai ir lazerinės spinduliuotės pluošto skersmeniui keisti, kur optinėje sistemoje suformuotas lazerinės spinduliuotės pluoštas per optinį elementą, skirtą įeinantį pluoštą transformuoti pagal užduotą dėsnį, lokalizuojamas apdirbamame ruošinyje (19), kur ruošinio medžiaga yra žymia dalimi skaidri lazerinės spinduliuotės pluoštui,

optinėje sistemoje suformuoti pasirinkti lazerinės spinduliuotės pluošto impulso parametrai užtikrina lazerinės spinduliuotės energijos tankį, pakankamą židinio srityje pakeisti apdirbamos ruošinio medžiagos savybes,

valdomą perkėlimo mechanizmą, skirtą apdirbamos medžiagos ruošiniui perkelti atžvilgiu lazerinės spinduliuotės pluošto taip, kad perkeliant lazerio spinduliuotės pluošto fokusavimo židinį minėtame ruošinyje sukuria reikiamą skaičių pažaidos sričių ir suformuoja ruošinyje norimos trajektorijos pjovimo ir/arba skėlimo paviršių,

indą su chemine terpe, išdėstančią ruošinio medžiagą pažaidos srityje ir skirtą

ruošiniui joje patalpinti ir jo dalims atskirti vieną nuo kitos pagal suformuotą pjovimo ir/arba skėlimo paviršiaus trajektoriją,

b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad lazerinės spinduliuotės kelyje už optinės sistemos esantis optinis elementas (10), skirtas įeinantį lazerinės spinduliuotės pluoštui transformuoti pagal užduotą dėsnį, turi dvejetainę struktūrą, tolygiai keičiančią statmenai į ją krentančios lazerinės spinduliuotės pluošto Pancharatnam'o-Berry fazę (PBF), kur ruošinyje yra bent dvi minėtos dvejetainės struktūros sritys su skirtingais PBF kitimo dėsniais ir jų orientacija krentančio į elementą pluošto atžvilgiu, kur minėtos struktūros sritys elemente suformuoja atitinkamai bent du interferuojančius subpluoštus, gaunant suminį nedifraguojantį lazerinės spinduliuotės pluoštą, turintį norimos energijos, fazės bei poliarizacijos necentrosimetrinį skirstinį, geriau pailgo pavidalo, plokštumoje, statmenoje lazerinės spinduliuotės pluošto sklidimo kryptiai, ir turintį pagrindinį energijos maksimumą ir šalutinius energijos maksimumus, kur optinis elementas (10) sumontuotas galinčiame pasisukti apie savo ašį tvirtinimo mechanizme (12), skirtame elemento (10), ir jame suformuotų dvejetainių struktūrų sričių padėčiai keisti, elemento (10) suformuotas minėtas suminis nedifraguojantis lazerinės spinduliuotės pluoštas per fokusuojančią optiką (15, 16, 17) lokalizuojamas apdirbamame ruošinyje, kur pasukant optinį elementą (10) minėtu mechanizmu (12) pakeičiama suformuotos pailgos pažaidos srities orientacija pagal pjovimo linijos trajektoriją, o valdomu perkėlimo mechanizmu ruošinį perkelia taip, kad suformuotos pailgo pavidalo bendros pažaidos sritys, sudarytos iš ruošinio medžiagos fizinių pokyčių ir cheminių ruošinio medžiagos pokyčių, išsidėsto išilgai viena po kitos pagal pjovimo ir/arba skėlimo trajektoriją taip, kad suformuotos pailgos pažaidos sritys dėl fizinių ruošinio medžiagos pokyčių išsidėsto išilgai viena po kitos su tarpais pagal pjūvio ir/arba skėlimo trajektoriją, o pažaidos sritys dėl cheminių ruošinio medžiagos pokyčių pratęsia pagal pjūvio trajektoriją pažaidos sritis susidariusias dėl fizinių pažaidos pokyčių tiek, kad gretimos bendros pažaidos sritys susiliečia arba dalinai persikloja.

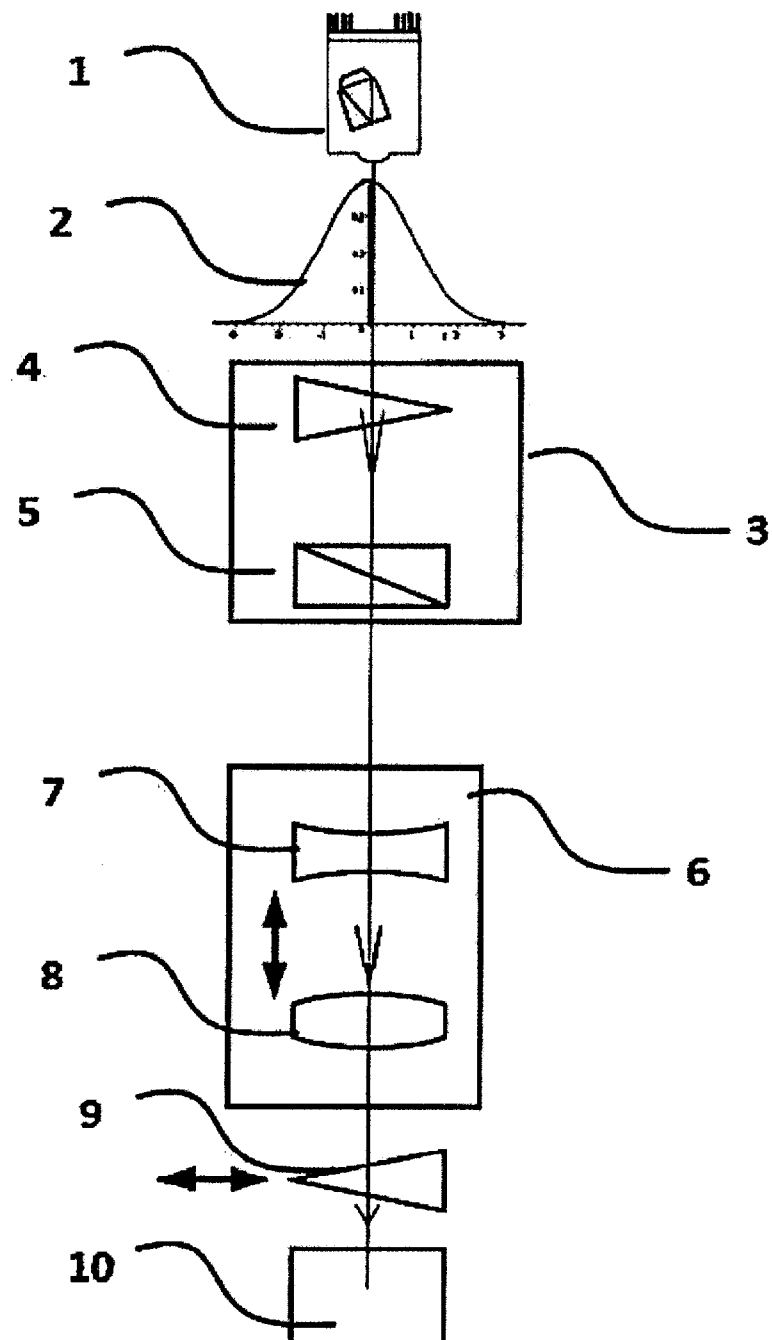


Fig.1

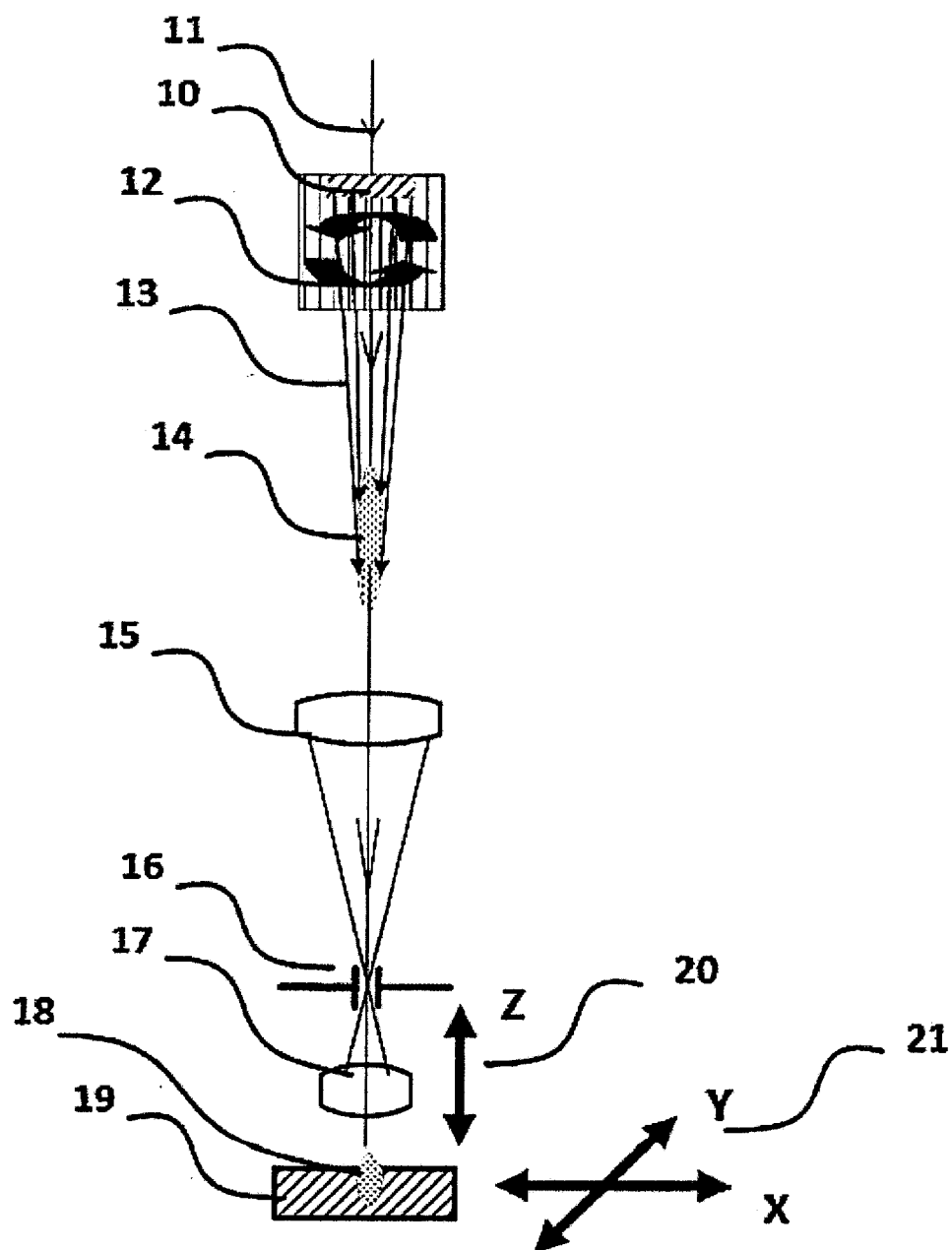


Fig.2

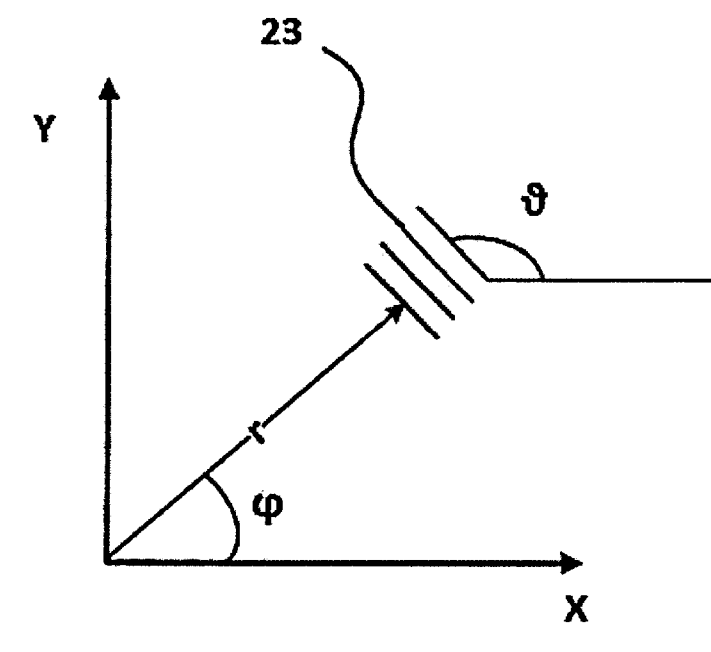


Fig.3

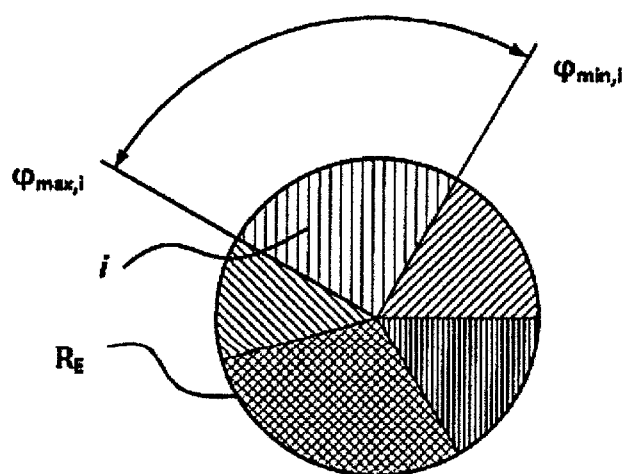


Fig.4

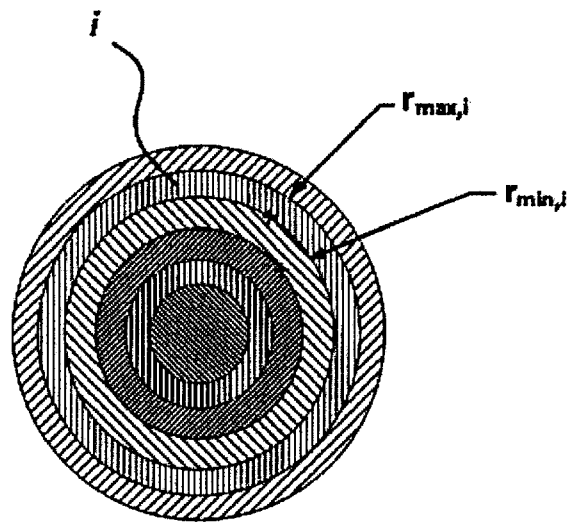


Fig.5

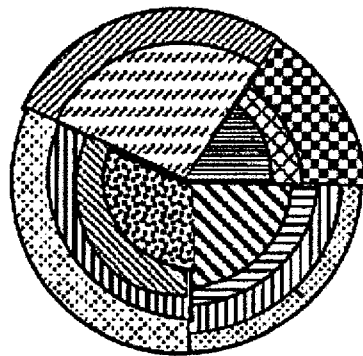


Fig.6

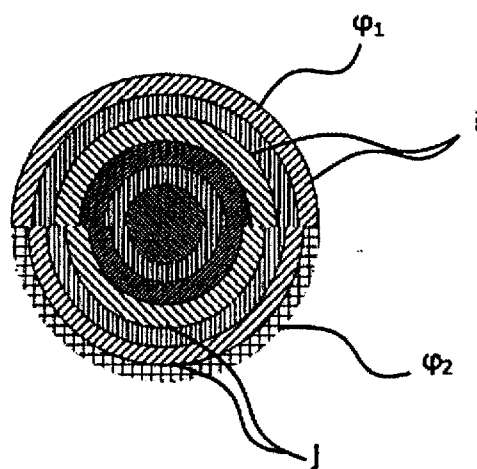


Fig.7

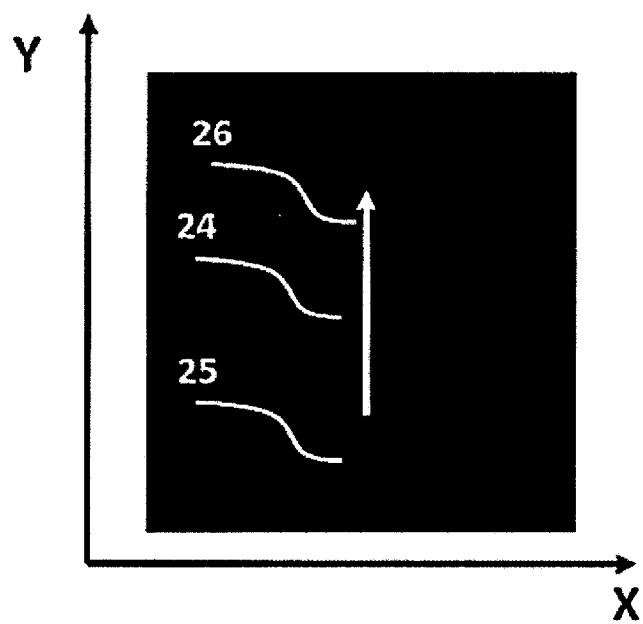


Fig.8

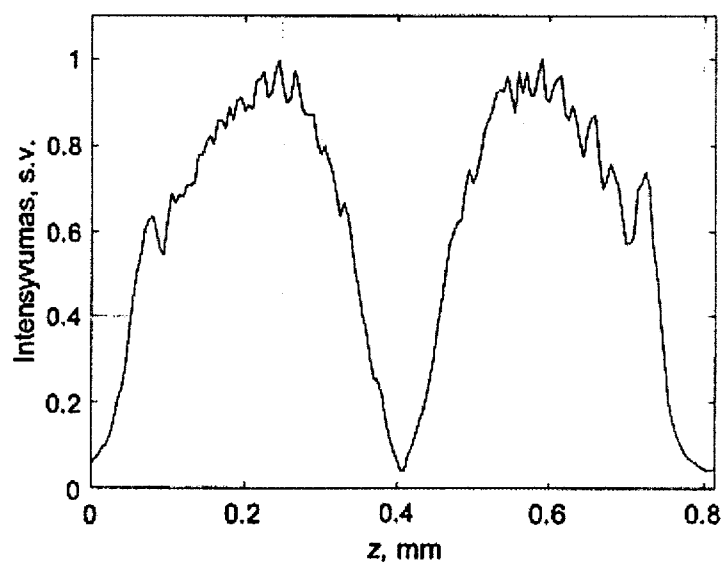


Fig.9

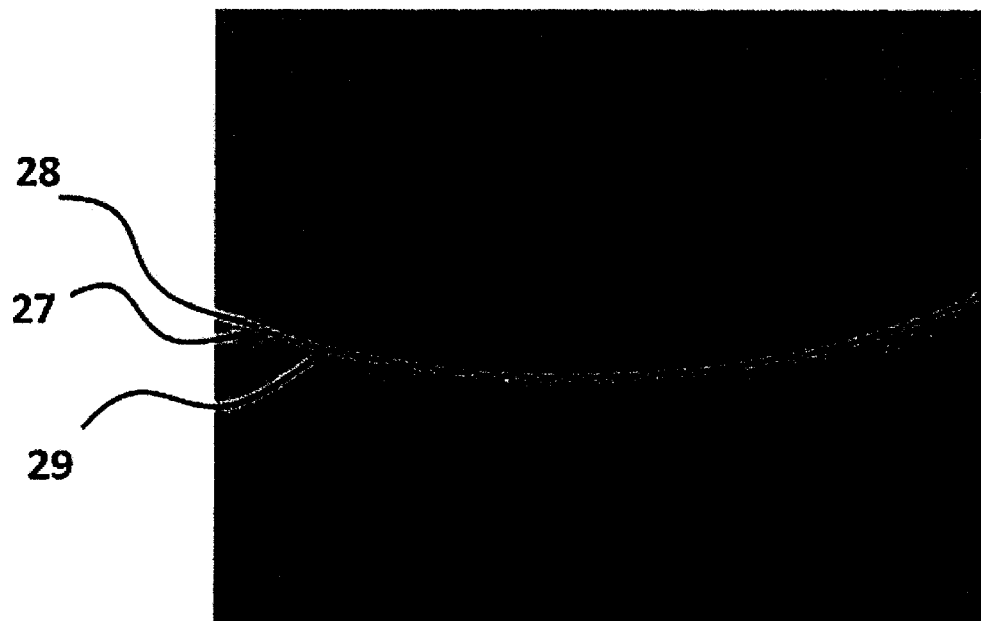


Fig.10



Fig.11

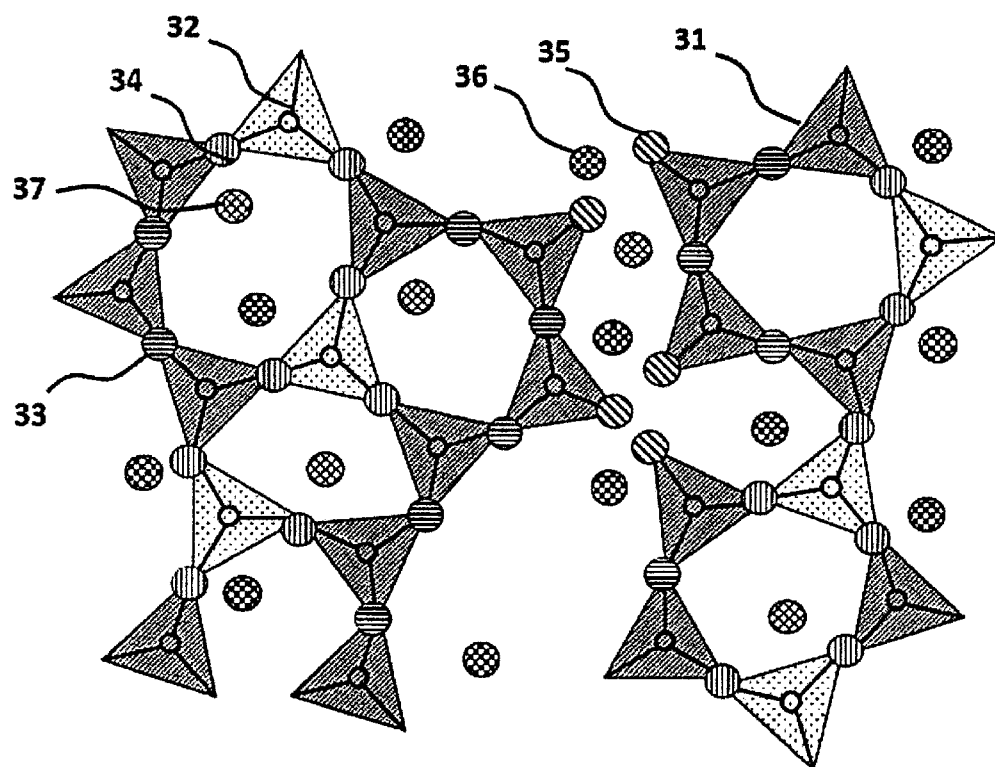


Fig.12

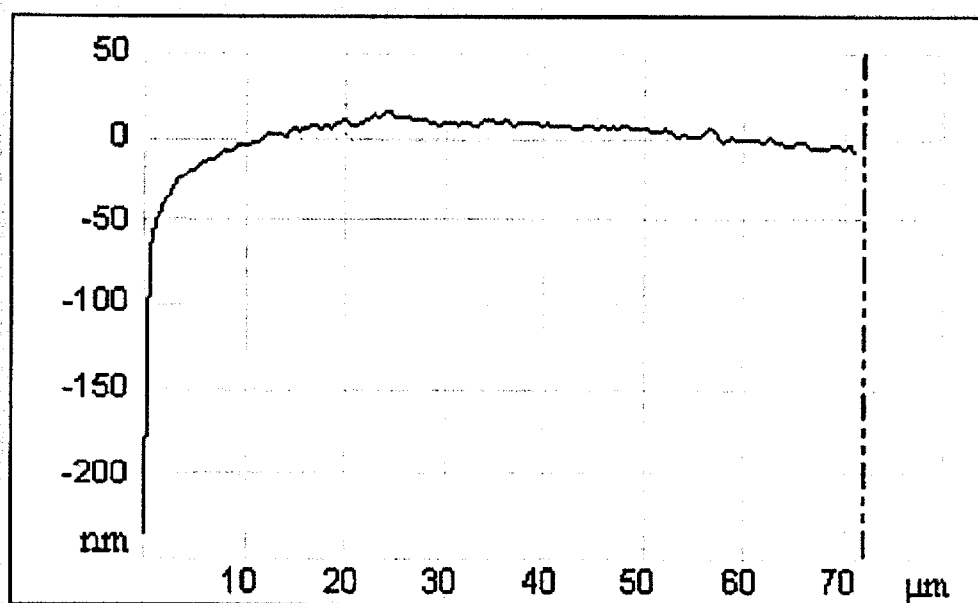


Fig.13