

G02F 1/01 (2006.01)

G02F 1/29 (2006.01)

G02B 21/18 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKAÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: 2019-637
(22) Přihlášeno: 11.10.2019
(40) Zveřejněno: 09.12.2020
(Věstník č. 50/2020)
(47) Uděleno: 29.10.2020
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: 09.12.2020
(Věstník č. 50/2020)

(56) Relevantní dokumenty:
US 2017184882 A1; US 4872743; US 2007292075 A1; US 6311004 B1; JP 2003043428 A.

(73) Majitel patentu:
Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Praha
8, Kobylisy, CZ

(72) Původce:
Marek Piliarik, Ph.D., Líbeznice, CZ
Marc Louis Robert Hadrien, Ph.D., Praha 8,
Kobylisy, CZ

(74) Zástupce:
HARBER IP s.r.o., Dukelských hrdinů 567/52,
170 00 Praha 7, Holešovice

(54) Název vynálezu:
Termooptický prostorový modulátor světla

(57) Anotace:
Předkládané řešení se týká prostorového modulátoru světla, přičemž uvedený prostorový modulátor světla obsahuje:
- vrstvu termooptického média, přičemž termooptické médium je alespoň částečně transparentní alespoň pro jednu spektrální složku viditelného nebo blízkého infračerveného světla a má tepelnou vodivost mezi $0,01$ a $30 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$, přičemž uvedená vrstva má tloušťku do $100 \text{ }\mu\text{m}$;
- alespoň jeden topný mikrozdroy v tepelném kontaktu s vrstvou termooptického média, přičemž každý topný mikrozdroy má alespoň jeden rozměr menší než $10 \text{ }\mu\text{m}$; a
- alespoň jeden substrát v tepelném kontaktu s termooptickým médiem, přičemž uvedený substrát má termooptický koeficient alespoň 10krát menší než je termooptický koeficient termooptického média a tepelnou vodivost alespoň $1 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$, přičemž tepelná vodivost substrátu je vyšší než tepelná vodivost termooptického média.
Topným mikrozdroyem (topnými mikrozdroyi) mohou být fototermální prvky nebo elektrotermální prvky.
Řešení dále poskytuje zobrazovací systém obsahující uvedený prostorový modulátor světla a způsoby modulace světla a interferenčního zobrazování pomocí prostorového modulátoru světla podle tohoto řešení.

Termooptický prostorový modulátor světla

Oblast techniky

5

Předkládaný vynález se týká prostorového modulátoru světla a interferenčního zobrazovacího systému, který obsahuje uvedený prostorový modulátor světla.

10

Dosavadní stav techniky

Prostorové modulátory světla (SLM) jsou aktivní optické součástky, které vytvářejí prostorově proměnlivou modulaci konkrétní světelné vlastnosti, jako je intenzita, fáze nebo polarizace optického svazku. SLM umožnily v oblasti astronomie a mikroskopie důležitá zlepšení a staly se
15 základním nástrojem pro efektivní provádění aktivního tvarování fáze. Mezi nejdůležitější aplikace SLM patří tvarování svazků, používané v zobrazování se super vysokým rozlišením a technikách digitální holografie, a adaptivní optika, která umožňuje korekce tvaru svazku při zobrazování skrze
20 nehomogenní materiály, jako je atmosféra v astronomii nebo difuzní tkáň v biologii. Moderní SLM jsou založeny na soustavě mikropixelů elektronicky adresovatelných pro prostorové tvarování čela vlny příchozího světla. Pro vytvoření místně omezené prostorové světelné modulace existují dva hlavní technologické přístupy, založené buď na matici digitálních mikrozrcadel s upravitelnými polohami, nebo matici tekutých krystalů s elektronicky upravitelným dvojlomem. Mezi hlavní omezení těchto různých přístupů patří pomalý čas reakce, disperzní efekty, difrakční
25 efekty, anizotropní efekt u tekutých krystalů a difrakční efekty, a nemožnost kontinuálního seřizování zařízení s digitálními mikrozrcadly.

Termooptický efekt je obvyklý způsob řízení fázového posunu ve vlnovodné optice díky silné lokalizaci optického pole, popsané např. v US 6311004. V konfiguraci volného prostorového
30 zobrazování je však termooptický efekt spojen s několika vedlejšími efekty a zobrazovacími chybami. Teplotní gradient může vyvolat mechanický posun, gradientní efekt čočky, a makroskopické zahřívání je svojí podstatou pomalé. V mikroskopickém měřítku je časová odezva místního zahřívání kvadraticky závislá na charakteristických rozměrech, a v měřítcích pod $\sim 10 \mu\text{m}$ je možné dosáhnout submilisekundového režimu. V jednom příkladu, kdy jsou kovové nanočástice osvětlovány na jejich plasmonové rezonanci, je část dopadajícího světla absorbována, čímž se
35 stávají účinnými tepelnými nanozdroji; tento efekt se nazývá termoplasmonový efekt. Místní zdroj tepla však *a priori* generuje v okolí tepelného zdroje gradientní teplotní profil, který lze použít k poskytování informací o snímání fází, např. pro tepelné zobrazování (*ACS nano*, 6(3), 2452 až 2458) nebo použití k zaostřování ve fototermální čočce s proměnlivým zvětšením (*ACS Photonics*, vol. 2, pp. 355 až 360 a US 9804424). Teplotní gradient vytvářený v polo-nekonečném kapalném
40 médiu vyvolává trojrozměrný gradient v indexu lomu média, což způsobuje gradientní efekt čočky. Bylo prokázáno, že ohniskovou vzdálenost čočky lze ladit od několika μm s časovou odezvou pouhých 200 μs . Využití výhody nativního gradientu vyvolaného tepelným tokem k vytvoření specifických aktivních optických komponent bylo dosud jedinou možností, jak docílit velmi specifického úkolu tvarování čela vlny.

45

Hlavní výzvou při vývoji termooptického prostorového modulátoru světla zůstalo vytvoření jednotného teplotního profilu v místním prostorovém ohraničení pro světelný paprsek ve volném prostoru.

50

Podstata vynálezu

Předmětem předkládaného vynálezu je nový typ prostorového modulátoru světla, využívající termooptický efekt k vytváření oblastí místní semiuniformní změny indexu lomu, který není citlivý

na polarizaci, neobsahuje zbytkové difrakční vzory a dokáže dosáhnout frekvenci modulace až v řádu MHz s dostupným plným rozsahem fázového posunu.

5 V prvním provedení předkládaný vynález poskytuje prostorový modulátor světla, přičemž uvedený prostorový modulátor světla obsahuje:

- vrstvu termooptického média, přičemž termooptické médium je alespoň částečně transparentní nejméně pro jednu spektrální složku viditelného nebo blízkého infračerveného světla a má tepelnou vodivost mezi $0,01$ a $30 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$, přičemž uvedená vrstva má tloušťku do $100 \text{ }\mu\text{m}$,
- 10 - alespoň jeden topný mikrozdroy v tepelném kontaktu s vrstvou termooptického média, přičemž každý topný mikrozdroy má alespoň jeden rozměr menší než $10 \text{ }\mu\text{m}$;
- alespoň jeden substrát v tepelném kontaktu s termooptickým médiem, přičemž uvedený substrát má termooptický koeficient alespoň 10krát menší než termooptický koeficient termooptického média a tepelnou vodivost alespoň $1 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$, přičemž tepelná vodivost substrátu je vyšší než tepelná vodivost termooptického média.
- 15

Termín „spektrální složka světla“ označuje specifickou vlnovou délku nebo kontinuální rozsah vlnových délek světla.

20 Termín „alespoň částečně transparentní“ označuje médium, které má alespoň částečnou propustnost pro příslušnou spektrální složku, s výhodou nejméně 50% propustnost pro příslušnou spektrální složku.

25 Ultrafialové světlo je světlo o vlnové délce v rozsahu od 10 do 380 nm .

Viditelné světlo je světlo o vlnové délce v rozsahu od 380 do 800 nm .

30 Blízké infračervené světlo je světlo o vlnové délce v rozsahu od 800 do 2500 nm .

Infračervené světlo je světlo o vlnové délce v rozsahu od $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ do $1000 \text{ }\mu\text{m}$.

Termín „termooptický koeficient“ označuje první člen Taylorovy řady citlivosti indexu lomu na teplotu.

35 Termín „v tepelném kontaktu“ je třeba chápat tak, že teplotní změna vyvolaná v předmětu A, který je v tepelném kontaktu s jiným předmětem B, má za následek odpovídající změnu teploty alespoň v části objemu předmětu B, s výhodou tak, že předmět A má alespoň jeden společný povrch s předmětem B.

40 Termín „modulační paprsek“ znamená paprsek světla, používaný k ohřevu topných mikrozdroyů absorpcí světla. Výhodně má modulační paprsek homogenní profil intenzity nebo profil intenzity odpovídající Besselově funkci, zejména dvoudimenzionální Fourierově transformaci disku.

45 Termín „testovací paprsek“ znamená paprsek světla určený pro modulaci prostorovým modulátorem světla. Výhodně je testovací paprsek vyzařován z alespoň jednoho světelného zdroje s homogenním čelem vlny nebo je testovací paprsek součástí světelné vlny odražené na předmětu nebo je testovací paprsek součástí světelné vlny rozptýlené na předmětu nebo je testovací paprsek kombinací výše uvedeného.

50 Vrstva termooptického média má tloušťku do $100 \text{ }\mu\text{m}$. S výhodou je tloušťka do $20 \text{ }\mu\text{m}$, výhodněji v rozsahu 1 až $100 \text{ }\mu\text{m}$ nebo 1 až $20 \text{ }\mu\text{m}$. Vrstva termooptického média může mít jednotnou (homogenní) tloušťku nebo nejednotnou (heterogenní) tloušťku, např. tloušťka může tvořit gradient.

55

S výhodou má termooptické médium velikost termooptického koeficientu $|dn/dT|$ rovnající se nebo vyšší než $8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ při teplotě 20°C a pro vlnovou délku v rozsahu od viditelného do infračerveného světla, tj. vyšší nebo rovnou termooptickému koeficientu vody.

- 5 V některých provedeních je termooptické médium vybráno ze skupiny zahrnující olej, vodu, alkohol (např. glycerol, oktanol, dodekanol, ethylenglykol, diethylenglykol, polyvinylalkohol (PVA)), polydimethylsiloxan (PDMS), sklo SF typu, safír, epoxid, polymethylmethakrylát (PMMA), polyvinylchlorid (PVC), polyethylmethakrylát (PEMA), *terc*-butyl polyetheretherketon, polystyren, silikon, polykarbonát nebo urethan-akrylátový elastomer.

10 Termooptické médium může být v některých provedeních ve formě kapaliny, gelu nebo koloidního roztoku (sol-gelu).

Ohřev dodávaný topným mikrozdrcem může být způsoben například:

- 15
- ozářením modulačním paprskem, který má plazmonovou frekvenci topných mikrozdrců (kterými jsou zejména nanočásticové fototermální prvky);
 - ozářením modulačním paprskem, který je absorbován topnými mikrozdrci (kterými je zejména vrstva fototermálních prvků);
 - 20 - Jouleovým jevem nebo indukčním ohřevem generovaným proudem v elektricky vodivém obvodu topných mikrozdrců (kterými jsou zejména elektrotermální prvky).

V některých provedeních mohou být topnými mikrozdrci fototermální prvky, které jsou v tepelném kontaktu s vrstvou termooptického média, přičemž uvedené fototermální prvky mají alespoň jeden rozměr menší než $10 \mu\text{m}$ a absorbují alespoň jednu složku spektra ultrafialového, viditelného, blízkého infračerveného nebo infračerveného světla.

30 Tyto fototermální prvky jsou obvykle vyrobeny z kovů (např. zlato, stříbro, hliník), nitridů kovů (např. nitrid titanu, nitrid zirkonu, nitrid tantalu), oxidů kovů (např. cínem dopovaný oxid inditý, ITO), uhlíku.

35 Tyto fototermální prvky mohou být umístěny na rozhraní substrátu a termooptického média a/nebo rozptýleny (dispergovány) v termooptickém médiu a/nebo umístěny v konkrétní oblasti termooptického média. Rozptýlení je vhodné zejména pro fototermální prvky ve formě nanočástic, zejména nanočástic o velikosti menší, než je centrální vlnová délka testovacího paprsku.

40 V některých provedeních mohou mít fototermální prvky v podstatě tvar koulí, polokoulí, tyčinek, krychlí, hvězd, sloupů, disků nebo směsi takových tvarů. V případě rozptýlených prvků lze použít i koloidní částice. Fototermální prvky mají typicky nano rozměry (jedná se o nanočástice), tj. největší rozměr je do $1 \mu\text{m}$, výhodně méně než 100 nm . Je výhodné, když mají nanočásticové fototermální prvky velikost menší, než je centrální vlnová délka testovacího paprsku.

45 S výhodou je objem jednotlivých nanočásticových fototermálních prvků v rozmezí $0,1 \text{ nm}^3$ až $1 \mu\text{m}^3$.

Pokud jsou fototermální prvky umístěny na rozhraní substrátu a termooptického média a/nebo umístěny v konkrétní oblasti termooptického média, mohou být uspořádány s povrchovou hustotou (tj. množstvím fototermálních prvků na jednotku plochy) od $0,01 \mu\text{m}^{-2}$ do $10\,000 \mu\text{m}^{-2}$, s výhodou od $1 \mu\text{m}^{-2}$ do $1000 \mu\text{m}^{-2}$. Pokud jsou rozptýleny v termooptickém médiu, mohou být uspořádány s objemovou hustotou (tj. množstvím fototermálních prvků na jednotku objemu) od $0,01 \mu\text{m}^{-3}$ do $10000 \mu\text{m}^{-3}$, s výhodou od $1 \mu\text{m}^{-3}$ do $100 \mu\text{m}^{-3}$.

55 V některých provedeních mohou být fototermální prvky suspendovány nebo dispergovány (rozptýleny) ve vrstvě pomocného materiálu, čímž vytvoří vrstvu, která může být umístěna na rozhraní substrátu a termooptického média a/nebo umístěna v konkrétní oblasti termooptického

média. Tloušťka této vrstvy může tvořit gradient. Tloušťka vrstvy pomocného materiálu je do 100 μm . S výhodou je tloušťka této vrstvy do 20 μm , výhodněji v rozsahu 1 až 100 μm nebo 1 až 20 μm . Fototermální prvky jsou dispergovány nebo suspendovány v pomocném materiálu s objemovou hustotou od 0,01 μm^{-3} do 10000 μm^{-3} , s výhodou od 1 μm^{-3} do 100 μm^{-3} . Pomocný materiál může být s výhodou vybrán z pevných materiálů, jako jsou sklo typu SF, safír, epoxid, polymethylmethakrylát (PMMA), polyethylmethakrylát (PEMA), *terc*-butyl polyetheretherketon, polydimethylsiloxan (PDMS), polyvinylchlorid (PVC), polyvinylalkohol (PVA), polystyren, silikon, polykarbonát a urethan-akrylátový elastomer; nebo z kapalných materiálů, jako jsou olej, voda a alkohol (např. glycerol, ethylenglykol, oktanol, pentanol, diethylenglykol). Pomocný materiál může být v některých provedeních ve formě gelu nebo koloidního roztoku (sol-gelu).

V některých provedeních tvoří fototermální prvky spojitou nebo nespojitou vrstvu připojenou na povrch substrátu. Tato vrstva může být nanostrukturována (mít specifický nanoskopický vzorec). Maximální tloušťka této vrstvy je 10 μm , s výhodou do 100 nm (zejména u kovových vrstev).

Vrstva fototermálních prvků může být (alespoň částečně) transparentní nebo odrazivá alespoň pro jednu spektrální složku viditelného nebo blízkého infračerveného světla.

Pokud jsou topnými mikrozdrci fototermální prvky, prostorový modulátor světla dále obsahuje:

- jeden nebo více světelných zdrojů záření modulačního paprsku, jehož alespoň jedna spektrální složka světla může být absorbována fototermálními prvky,
- optický systém obsahující alespoň jeden prostředek pro směřování světla, umístěný mezi uvedenými jedním nebo více světelnými zdroji a fototermálními prvky.

Uvedený jeden nebo více světelných zdrojů záření modulačního paprsku mají obvykle nastavitelný světelný výkon v rozsahu alespoň od 0 do 1 mW, s výhodou od 0 do 1 W, a/nebo nastavitelné optické spektrum viditelného světla nebo blízkého infračerveného světla, kde rozsah nastavení činí alespoň 10 nm, výhodně alespoň 100 nm, a/nebo nastavitelnou polarizaci.

Prostředek pro směřování světla může být vybrán ze skupiny čoček, zrcadel, apertur, optických děličů, dichroických děličů svazku, akusto-optických modulátorů, elektrooptických modulátorů, komponent s rotujícím diskem, akusto-optických deflektorů, zařízení s digitálními mikrozrcadly, mikroelektromechanických systémů, galvanometrických zrcadel, optických mřížek nebo kombinace těchto prvků.

Optický systém je s výhodou konfigurován tak, že se obrazová rovina nebo zadní ohnisková rovina optického systému překrývá s vrstvou topného mikrozdrci.

V některých provedeních mohou být topnými mikrozdrci elektrotermální prvky, které mohou být zahřívány elektrickým proudem a které jsou v tepelném kontaktu s vrstvou termooptického média, přičemž uvedené elektrotermální prvky mají alespoň jeden rozměr menší než 10 μm a elektrickou vodivost alespoň 100 S/m.

Elektrotermální prvky jsou obvykle vyrobeny z kovu (např. měď, železo, zlato, stříbro, hliník, zinek, platina, iridium, nikl), oxidu kovu (např. cinem dopovaný oxid inditý, ITO) nebo uhlíku (např. grafit, grafen).

Elektrotermální prvky mohou být umístěny na povrchu substrátu.

Elektrotermální prvky mohou tvořit spojitý obvod.

Elektrotermální prvky mohou být upraveny pro ohřev Jouleovým jevem nebo indukčním ohřevem.

Substrát může být v některých provedeních vyroben z materiálu ze skupiny zahrnující sklo, sklokeramiku (např. zerodurové sklo), fluorid hořečnatý, safír, diamant, kov, teplovodný polymer nebo jejich kombinace.

- 5 Substrát může být (alespoň částečně) transparentní nebo odrazivý alespoň pro jednu spektrální složku viditelného nebo blízkého infračerveného světla.

- 10 Substrát může být uspořádán na jedné straně termooptického média, v tepelném kontaktu s termooptickým médiem. V některých provedeních se použije více než jeden substrát, s výhodou dva substráty, přičemž tyto substráty jsou umístěny na vzájemně protilehlých stranách termooptického média.

Ve druhém provedení poskytuje předkládaný vynález interferometrické zobrazovací zařízení, které obsahuje:

- 15
- zdroj záření testovacího paprsku, který má alespoň jednu spektrální složku světla,
 - optický dělič nebo segmentované zrcadlo,
 - zobrazovací prostředky,
 - prostorový modulátor světla podle předkládaného vynálezu,

20

 - zobrazovací optický systém, který obsahuje alespoň jednu čočku, zrcadlo a/nebo aperturu,
 - detektor.

Zdroj testovacího paprsku může s výhodou mít alespoň jednu spektrální složku ve viditelné nebo blízké infračervené oblasti, výhodněji může být zdrojem testovacího paprsku jednovidový laser.

- 25
- Optický dělič může být nepolarizační optický dělič s odrazivostí od 10 % do 90 %, s výhodou od 30 % do 70 %, nebo kombinace polarizačního optického děliče a čtvrtvlnné fázové destičky, která umožňuje vyšší účinnost zachycování zobrazovacího systému.

- 30
- Segmentované zrcadlo je rovinný optický prvek, který obsahuje specifický vzorec alespoň dvou různých povrchových úprav s rozdílnou odrazivostí, s výhodou má alespoň jeden povrch odrazivost vyšší než 90 % a alespoň jeden povrch má odrazivost menší než 10 % (např. skleněný substrát s částečně odrazivou oválnou oblastí menší než 2 mm, skleněný substrát s vysoce odrazivou povrchovou úpravou po celém povrchu kromě oválné oblasti menší než 2 mm).

- 35
- Zobrazovací prostředky mohou obsahovat mikroskopový objektiv nebo jedinou čočku s vysokým zvětšením nebo imersní půlkulatou čočku s numerickou aperturou (NA) alespoň 0,1.

Detektor může být bodový detektor světla, plošný detektor světla nebo kamera.

- 40
- V některých provedeních interferometrického zobrazovacího zařízení mohou být substrát, termooptické médium a topný mikrozdroy prostorového modulátoru světla uspořádány mezi zobrazovacími prostředky a detektorem, přičemž se zobrazovací rovina nebo zadní ohnisková rovina zobrazovacího optického systému překrývá s polohou prostorového modulátoru světla.

- 45
- Ve třetím provedení předkládaný vynález poskytuje způsob prostorové fázové modulace testovacího paprsku světla pomocí prostorového modulátoru světla podle předkládaného vynálezu, přičemž uvedený způsob zahrnuje tyto kroky:

- 50
- vyzařuje se testovací paprsek po osvětlovací optické dráze,
 - testovací paprsek se směřuje přes prostorový modulátor světla podle předkládaného vynálezu, přičemž prostorovým modulátorem světla prochází alespoň část testovacího paprsku přes vrstvu termooptického média, a

- alespoň část testovacího paprsku prochází skrz alespoň jeden substrát a alespoň jeden topný mikrozdvoj, nebo
 - testovací paprsek se alespoň částečně odráží na alespoň jednom substrátu nebo alespoň jednom topném mikrozdvoji, a
- 5 - alespoň jeden topný mikrozdvoj se zahřeje, čímž se zahřeje i sousední termooptické médium, čímž dojde k lokální změně indexu lomu termooptického média; a v místě ohřevu se tak způsobí posun čela vlny testovacího paprsku prostřednictvím uvedené lokální změny indexu lomu termooptického média, s výhodou tak, že obdélníkový profil teplotní změny způsobí posun v čele vlny testovacího paprsku blízký obdélníkovému profilu, který má ve čtvrtině maxima plnou šířku (full-width-at-quarter-maximum, FWQM) tepelně vyvolaného fázového posunu na testovacím paprsku menší než trojnásobek šířky obdélníkového teplotního profilu, s výhodou menší než dvojnásobek šířky obdélníkového teplotního profilu.

15 Osvětlovací optická dráha obvykle zahrnuje optické prvky, jako jsou čočky, zrcadla nebo optické děliče nebo jejich kombinaci.

Ve čtvrtém provedení předkládaný vynález poskytuje způsob interferometrického zobrazení objektu s nastavitelnou fází testovacího paprsku pomocí prostorového modulátoru světla podle předkládaného vynálezu, přičemž uvedený způsob zahrnuje tyto kroky:

- 20
- vyzařuje se testovací paprsek po osvětlovací optické dráze, zahrnující alespoň jednu čočku, zrcadlo nebo aperturu,
 - testovací paprsek se směřuje skrz zobrazovací prostředky na objekt, čímž se vytvoří odražený nebo procházející paprsek, a rozptýlený paprsek,
- 25
- zachytí se odražený nebo procházející paprsek a rozptýlený paprsek pomocí zobrazovacích prostředků,
 - pomocí stejných zobrazovacích prostředků se zachytí rozptýlený paprsek na objektu,
 - zachycený rozptýlený paprsek a zachycený odražený nebo procházející paprsek se vedou prostorovým modulátorem světla, zejména vrstvou termooptického média prostorového modulátoru světla,
- 30
- fáze odraženého nebo procházejícího paprsku se moduluje lokálním optickým nebo elektrickým ohřevem termooptického média pomocí alespoň jednoho topného mikrozdvoje.

35 Metodou měření velikosti částic (fototermálních prvků, elektrotermálních prvků) je transmisní elektronová mikroskopie (TEM) nebo skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie (SEM) pro laterální rozměr a mikroskopie atomárních sil (AFM) pro tloušťku, a maximální zde uvedený rozměr představuje maximální rozměr jakékoli částice v souboru částic.

40 Metoda měření objemu částice zahrnuje měření velikosti částice a výpočet horního odhadu objemu kulové částice, polokoulí, krychlí, a hvězd, s uvážením objemu ideální koule maximálních rozměrů těchto částic nebo výpočet horního odhadu objemu nanotyčinek, sloupů nebo disků z naměřených rozměrů, s uvážením tvaru ideálního kvádra.

45 Objasnění výkresů

Obr. 1a až i: zobrazují různé konfigurace fázového modulačního prvku.

50 Obr. 2: zobrazuje provedení prostorového modulátoru světla v konfiguraci s prostorovým překrytím modulačního paprsku a testovacího paprsku ve společném ohnisku.

Obr. 3: zobrazuje provedení prostorového modulátoru světla s fokusovaným modulačním paprskem, akusticko-opticky skenovaným napříč oblastí testovacího paprsku, přičemž v časovém průběhu intenzity modulačního paprsku je zakódované prostorové rozložení fázové modulace testovacího paprsku.

55

Obr. 4: zobrazuje provedení prostorového modulátoru světla, ve kterém se pomocí digitálního mikrozrcadlového zařízení prostorově moduluje rozložení modulačního paprsku.

- 5 Obr. 5: zobrazuje obraz zlatých nanotyčinek, imobilizovaných na substrátu, ze skenovacího elektronického mikroskopu (SEM), tyto zlaté nanotyčinky byly použity jako vrstva fototermálních prvků (měřítko = 200 nm).

10 Obr. 6: zobrazuje extinkční spektrum zlatých nanotyčinek imobilizovaných na substrátu zobrazených na obr. 5.

Obr. 7: zobrazuje schéma konfigurace interferometrického zobrazení objektu s nastavitelnou fází odraženého paprsku pomocí prostorového modulátoru světla podle tohoto vynálezu.

- 15 Obr. 8a až c: zobrazují experimentální interferometrické snímky zlatých nanokuliček získaných při třech různých fázových posunech odraženého paprsku, vyvolaných pomocí prostorového modulátoru světla ve specifickém profilu pole (měřítko = 0,5 μm).

20 Obr. 9: zobrazuje experimentální výsledky závislosti interferenčního kontrastu rozptylujícího objektu na intenzitě modulačního paprsku.

Obr. 10: zobrazuje experimentální časovou odezvu tepelně vyvolaného fázového posunu. Horní diagram zobrazuje časový průběh intenzity modulačního paprsku, dolní diagram interferenčního kontrastu.

25 Obr. 11a až b: zobrazují experimentální interferometrické obrazy zlatých nanokuliček používaných k charakterizaci zbytkového efektu tepelné čočky (thermal lensing).

30 Obr. 12a až c: zobrazují experimentální výsledky charakterizující relativní posun obrazu tří nanokuliček zobrazených na obr. 11a až b, v důsledku fázového posunu o π .

Obr. 13: zobrazuje výsledky numerických simulací rychlosti časové odezvy v závislosti na vzdálenosti šíření tepla (s výhodou odpovídající tloušťce termooptického média), s uvažováním glycerolu jako termooptického média. Osy X a Y jsou v logaritmickém měřítku.

35 Obr. 14: zobrazuje výsledky numerických simulací modelovaného fázového posunu v závislosti na teplotní změně tepelného zdroje (např. vrstvy fototermálních prvků). Uvažovaný systém obsahuje tepelný zdroj o průměru 60 μm , glycerolovou vrstvu o tloušťce 20 μm jako termooptické médium, které je uspořádané mezi skleněným krycím sklíčkem a safírovým okénkem.

40 Obr. 15: zobrazuje výsledky numerických simulací profilu fázového posunu pro diskový tepelný zdroj o průměru 100 μm a glycerolové termooptické médium o tloušťkách 250 μm , resp. 5 μm . Termooptické médium bylo uspořádané mezi skleněným krycím sklíčkem a safírovým okénkem.

45 Příklady uskutečnění vynálezu

Předmětem předkládaného vynálezu je řešení poskytující prostorový modulátor světla, konkrétněji fázový modulátor světla. Vynález umožňuje vytvořit potřebné rozložení změny indexu lomu ve
50 vrstvě termooptického média pomocí přesně kontrolovaného plošného rozložení změny teploty, které kopíruje rozložení zdroje teplotní změny a jeho modulace, zejména optické nebo elektrické modulace. Nová struktura využitá ve vynálezu umožňuje udržet téměř konstantní plošné rozložení teplotního profilu v blízkosti prostorově omezeného zdroje tepla a minimalizuje gradientní rozmazání modulovaného vzoru teplotní difúzí. Stručně řečeno, princip je založen na vložení tenké
55 vrstvy termooptického média s vysokou citlivostí indexu lomu na teplotu mezi topnou vrstvou

topných mikrozdrojů (fototermálních nebo elektrotermálních prvků) a teplotně vodivý transparentní substrát. Jakmile v případě fototermálních prvků vytvoří zdroj modulačního paprsku požadovaný vzor teplotní změny ve vrstvě fototermálních prvků s nejmenšími detaily omezenými pouze difrakcí světla, generované teplo je vedeno směrem k substrátu o vysoké teplotní vodivosti, který slouží jako výměník tepla, ve kterém přebytek vytvořeného tepla vyprchá do prostředí. Podobně může být vytvořen požadovaný vzor teplotní změny v elektrotermálních prvcích pomocí Jouleova jevu nebo indukce.

Pokud topné mikrozdroje tvoří nepřetržitou nebo přerušovanou vrstvu, teplotní gradient vzniká dominantně napříč vrstvou termooptického média ve směru kolmém na vrstvu topných mikrozdrojů. Strmost tohoto gradientu je odvozena od tloušťky vrstvy termooptického média a teplotního rozdílu mezi topným mikrozdrojem (např. fototermálním prvkem) a substrátem. V důsledku toho se i v laterálním směru gradient mezi plochami s různými teplotami mění s kolmým gradientem a může být tedy upraven na strmou funkci blízkou schodovité snížením tloušťky vrstvy termooptického materiálu a zvýšením tepelné vodivosti substrátu. Tímto způsobem vytvoříme optický fázový modulátor pro prostorově rozlišenou a rychlou modulaci fáze v nevlnovodném optickém systému.

Experimentálně jsme testovali účinek termooptické prostorové fázové modulace v konfiguraci s homodynním interferometrem se sdílenou optickou dráhou zobrazeným na obr. 7. V tomto experimentu, který je znám i jako interferenční mikroskopie rozptýleného světla (iSCAT), bylo rovinné rozhraní obsahující rozptylující objekty 19 (v jednom konkrétním zkoušeném příkladu se jednalo o 30 nm zlaté nanokuličky) přichyceno na skleněném krycím sklíčku 18 osvětlováno testovacím paprskem (konkrétně rovinnou koherentní vlnou o vlnové délce 488 nm) 20 za vzniku odraženého paprsku od skleněného krycího sklíčka a rozptýleného paprsku od rozptylujícího objektu 19. Odražený paprsek a rozptýlený paprsek byly zachyceny pomocí zobrazovacích prostředků (např. objektivu mikroskopu) 17 a zobrazeny na detektoru (např. kamera CMOS) 21, kde se tyto dva paprsky překrývaly a interferovaly. V zobrazovací dráze paprsku vytvořily odražený paprsek a rozptýlený paprsek dvě optické vlny se stejnou trajektorií skrz optický systém 12, s různými prostorovými profily v průřezu kolmém na dráhu paprsku. Konkrétně v zadní ohniskové rovině mikroskopu byl odražený paprsek fokusován do oblasti o průměru 60 μm, zatímco rozptýlený paprsek se šířil jako paralelní vlna o průměru přibližně 8 mm. Abychom vyzkoušeli prostorové fázové modulační zařízení, umístili jsme v jednom příkladu do zadní ohniskové roviny zobrazovací dráhy paprsku fázový modulační prvek 6 kolmo na směr šíření paprsků. Fázový modulační prvek 6 obsahoval skleněné krycí sklíčko se zlatými nanotyčinkami o rozměru 20 nm x 50 nm (průměr x délka) o hustotě 300 μm⁻¹ a náhodné orientaci v rovině (obrázek skenovacího elektronického mikroskopu na obr. 5 a odpovídající extinkční spektrum na obr. 6), vrstvu glycerolu o tloušťce <20 μm a leštěný safírový substrát o tloušťce 3 mm. V místě fázového modulačního prvku 6 tvoří odražený paprsek a rozptýlený paprsek společně testovací paprsek 9 prostorového modulátoru světla. Přes dichroické zrcadlo 8 jsme modulačním paprskem 4, ze světelného zdroje 22 o vlnové délce 660 nm osvětlovali oblast o průměru 60 μm překrývající se s polohou odraženého paprsku. Změnou výkonu modulačního paprsku 4 akusticko-optickým modulátorem 10 v rozsahu od 0 do 130 mW jsme pozorovali velkou změnu kontrastu interferenčního signálu na kameře CMOS se zanedbatelným nebo žádným vlivem na profil intenzity odraženého paprsku (zobrazeno na obr. 8a až c). V obecně popsané konfiguraci je kontrast interferenčního signálu vyjádřen jako:

$$C = \frac{2s \cos(\Delta\varphi + \varphi_{SLM})}{r},$$

kde r je amplitudová odrazivost skleněného krycího sklíčka, s amplituda rozptylu, $\Delta\varphi$ fázový rozdíl mezi rozptýleným a odraženým paprskem a φ_{SLM} fázový posun vyvolaný prostorovým světelným modulátorem na odraženém paprsku. Průměrná změna kontrastu interferenčního obrazu získaná z několika různých nanočástic ukazuje sinusovou závislost na intenzitě modulačního

paprsku (obr. 9). Diagram časového průběhu modulace na obr. 10 ukazuje, že jsme byli schopni dosáhnout časové odezvy pouhých 70 μs (dolní diagram na obr. 10). Srovnáním absolutní změny v lokalizované poloze zobrazených nanočástic (obr. 11a až b) jsme zjistili, že posun fáze odraženého paprsku o π zkresluje obraz přenášený rozptýleným paprskem o méně než 10 nm v kterémkoli směru (obr. 12a až c). Pokud vztáhneme změnu polohy ke vzdálenosti mezi částicemi v zorném poli, lze konstatovat, že zkreslení obrazu přenášeného rozptýleným paprskem je menší než 0,5 %, což ukazuje, že efekt tepelné čočky v okolí zahřívané oblasti je zanedbatelný.

Charakteristický čas odezvy τ tepelného procesu potřebný k dosažení ustáleného stavu lze odhadnout z rovnice vedení tepla a je vyjádřen jako:

$$\tau = \frac{L^2 \rho c_p}{4\kappa},$$

kde L je charakteristická velikost systému, např. tloušťka nebo průměr zahřívané plochy v závislosti na tom, který parametr omezuje šíření tepla, ρ je hustota, c_p je tepelná kapacita a κ je tepelná vodivost termooptického média. Tato rovnice ukazuje, že čas reakce lze dále snížit zmenšením geometrie struktury s teoretickým limitem v rozsahu nanosekund, který je omezen difrakčním limitem optického zobrazení, jak je znázorněno na obr. 13.

Teoretický model tepelně vyvolaného fázového posunu je založen na řešení rovnice pro vedení tepla. Pro bodový tepelný zdroj poskytující výkon Q v homogenním kapalném médiu se rozložení teploty $T(\mathbf{r})$ v ustáleném stavu řídí následující rovnicí:

$$T(\mathbf{r}) = \frac{Q}{4\pi\kappa|\mathbf{r}|} + T_{\infty},$$

$$T(\mathbf{r}) = QG(\mathbf{r}) + T_{\infty},$$

kde κ je teplotní vodivost média ($\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$), $\mathbf{r}$ je 3D vektorová vzdálenost od zdroje tepla (m), T_{∞} je okolní teplota odpovídající teplotě výměníku tepla, a $G(\mathbf{r}) = 1/(4\pi\kappa|\mathbf{r}|)$ vyjadřuje Greenovu funkci rovnice pro vedení tepla. Systém použitý v tomto konceptuálním experimentu obsahoval třívrstvou strukturu fázového modulačního prvku: vrstvu kapalného glycerolu o tloušťce 20 μm uzavřenou mezi skleněným krycím sklíčkem a safirovým okénkem, obojí o tloušťce 140 μm , a vrstvu topných mikrozdrojů na rozhraní sklo/glycerol. V tomto případě má Greenova funkce složitější tvar v závislosti na tepelné vodivosti těchto tří vrstev a jejich vzájemné tloušťce a v našich simulacích používáme dříve odvozenou formu z odkazu Eng Anal Bound Elem. 1999;23(9):777 až 786.

Pokud uvažujeme dvojrozměrný vzorkovaný tepelný zdroj, lze pokládat Q za dvojrozměrnou funkci polohy. Rozložení teploty ve struktuře fázového modulačního prvku je proto spočtena konvolucí $Q(\rho)$ a $G(\rho, z)$:

$$T(\rho, z) = Q(\rho) \otimes G(\rho, z) + T_{\infty}.$$

$Q(\rho)$ představuje hustotu tepelného zdroje (W/m^2). ρ a z jsou cylindrické souřadnice systému, konkrétně ρ souřadnice rovnoběžná s tepelným zdrojem a z axiální souřadnice. V této simulaci jsou za topné mikrozdroje uvažovány fototermální prvky osvětlené modulačním paprskem o výkonu P (W) na ploše S (m^2), konkrétně jsou uvažovány zlaté nanotyčinky homogenně rozložené na skleněné vrstvě s absorpčním průřezem σ_{abs} (m^2). Celkový dodaný topný výkon Q je:

$$Q = \sigma_{abs} \frac{P}{S}.$$

Vztah mezi rozložením indexu lomu $\Delta n_i(\rho, z) = n_i(T(\rho, z)) - n_i(T_\infty)$ a teplotou $T(\rho, z)$ může být pro malou změnu teploty aproximován prvním členem Taylorova rozvoje závislosti indexu lomu na teplotě, který se obvykle nazývá termooptický koeficient dn/dT . Pokud uvažujeme modulační paprsek o vlnové délce λ , který se šíří ve směru osy z přes zahřívanou vrstvu, tepelně vyvolaný fázový posuv φ_{therm} činí:

$$\varphi_{therm} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\int_{-\Delta_1}^0 \Delta n_1(\rho, z) dz + \int_0^{\Delta_2} \Delta n_2(\rho, z) dz + \int_{\Delta_2}^{\Delta_3} \Delta n_3(\rho, z) dz \right),$$

kde Δ_1 a Δ_3 tloušťka dvou substrátů a Δ_2 je tloušťka termooptického média, Δn_1 a Δn_3 jsou variace indexu lomu spodního, respektive horního substrátu a Δn_2 je variace indexu lomu termooptického média.

Obr. 14 zobrazuje závislost výsledného fázového posunu na změně teploty související s topným výkonem použitým v modelu. Maximální fázový posuv je v tomto konkrétním systému omezen teplotou varu glycerolu (290 °C). Pro tento horní limit lze teoreticky dosáhnout fázového posunu $2,6 \pi$ v případě diskového tepelného zdroje o průměru 60 μm , vlnové délce testovacího paprsku 488 nm a vrstvou glycerolu o tloušťce 20 μm sendvičově uzavřenou mezi skleněným a safírovým substrátem. Obr. 15 zobrazuje profil fázového posunu testovacího paprsku 9 pro termooptické médium (glycerol) o tloušťce 250 μm (dlouze přerušovaná čára) a 5 μm (krátce přerušovaná čára). Profil fázového posunu pro vrstvu o tloušťce 250 μm ukazuje pomalý gradient fázového posunu, který se šíří stovky μm od zahřívání oblasti struktury. Kombinovaný účinek snížení tloušťky vrstvy termooptického média a vysoké tepelné vodivosti okolního substrátu má za následek změnu tvaru profilu gradientu na strmý schodovitý profil (krátce přerušovaná čára).

Na obr. 1 až 4 a 7 je popsáno několik možných provedení vynálezu a experimentální přístupy. Obr. 1 popisuje různá provedení fázového modulačního prvku 6 a obr. 2 až 4 a 7 různá provedení s fázovým modulačním zařízením v různých konfiguracích optického systému.

Příklad 1

V prvním příkladu provedení, načrtnutém na obr. 1a a obr. 1b, jsou topné mikrozdroje 3, kterými jsou v tomto příkladu fototermální prvky, konkrétně zlaté nanotyčinky o rozměru 20 nm x 50 nm (průměr x délka), hustotě 300 μm^{-2} a s náhodnou orientací (popsány na obr. 5 a 6), imobilizovány na substrátu 1 (ve specifických provedeních může být substrát např. ze skla, safíru nebo diamantu). Termooptické médium 2, v tomto konkrétním příkladu kapalný glycerol, je umístěno mezi vrstvu nanotyčinek a dalším substrátem 1 tak, aby vytvořil uniformní vrstvu. Světelný paprsek nazývaný modulační paprsek 4 o centrální vlnové délce blízké plasmonové rezonanci použitých zlatých nanotyčinek osvětluje fototermální prvky z kterékoli strany, jak je zobrazeno na obr. 1a, resp. obr. 1b.

Příklad 2

Ve druhém příkladu provedení (obr. 1c) jsou topné mikrozdroje 3 umístěny mezi dvě vrstvy termooptického média 2, které jsou mezi dvěma substráty 1 s vyšší tepelnou vodivostí než termooptická média. V této konfiguraci mohou být topné mikrozdroje 3 uzavřeny mezi dvě vrstvy pevných, skleněných nebo polymerních vrstev termooptického média. Mezi příklady termooptických médií 2 patří skla s vysokou citlivostí indexu lomu na teplotu, např. sklo P-SF68

($dn/dT=24.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) nebo polymery, např. PDMS ($dn/dT \approx -4.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$). K termooptické variaci indexu lomu tedy dochází na obou stranách topných mikrozdrojů a k šíření tepla dochází symetricky do obou substrátů.

5 Příklad 3

Ve třetím příkladu provedení (obr. 1d) je odrazivá plocha 5 pro modulační paprsek pod topnými mikrozdroji 3 (např. fototermálními prvky). V důsledku toho je modulační paprsek 4 absorbován topnými mikrozdroji 3 dvakrát, čímž se zvyšuje účinnost modulace.

10

Příklad 4

Čtvrtý příklad provedení (obr. 1e) kombinuje princip provedení popsanych v příkladech 2 a 3 a na obr. 1c a 1d. Topné mikrozdroje (např. fototermální prvky) 3 jsou umístěny mezi dvěma vrstvami termooptických médií 2. Odrazivá plocha 5 se nachází bezprostředně pod nebo nad jednou z vrstev termooptického média 2.

15

Příklad 5

Pátý příklad provedení (obr. 1f) je podobné provedení v příkladu 4, s tím, že mezi odrazivou plochou 5 a termooptickým médiem 2 se nachází transparentní substrát 1 umožňující lepší tvarování profilu variace tepelně vyvolaného indexu lomu.

20

Příklad 6

25

V šestém příkladu provedení (obr. 1g) jsou ke konfiguraci podle příkladu 2 přidána dvě polopropustná zrcadla navržená tak, aby tvořila Fabry-Perrotův rezonátor. V této konfiguraci lze docílit více průchodů světla skrze fázový modulační prvek 6 a poskytuje možnosti přímé amplitudové modulace pomocí prostorového světelného modulátoru.

30

Příklad 7

Sedmý příklad provedení (obr. 1h) zobrazuje případ, kde jsou topné mikrozdroje 3, kterými jsou v tomto příkladu fototermální prvky, konkrétně zlaté nanočástice nebo nanotyčinky suspendovány nebo dispergovány ve vrstvě pomocného materiálu (např. PDMS nebo glycerolu) a společně tvoří vrstvu 7 uzavřenou mezi dvěma substráty 1. Vrstva 7 plní funkci termooptického média a současně obsahuje topné mikrozdroje.

35

Příklad 8

40

Osmý příklad provedení (obr. 1i) je podobný provedení v příkladu 7. Topné mikrozdroje 3, kterými jsou v tomto příkladu fototermální prvky, konkrétně zlaté nanočástice nebo nanotyčinky jsou suspendovány nebo dispergovány ve vrstvě pomocného materiálu (např. PDMS) a tvoří vrstvu pomocného materiálu 7 mezi dvěma substráty 1. Tloušťka vrstvy 7 má lineární gradient, což umožňuje generovat lineární fázový gradient s další fázovou modulací.

45

Příklad 9

Devátý příklad provedení zobrazený na obr. 2 využívá jeden z fázových modulačních prvků uvedených na obr. 1a, b, c nebo h a v příkladech 1, 2, nebo 7, k vyvolání homogenního fázového posunu v omezeném průměru světelného paprsku, který se nazývá testovací paprsek 9. Testovací paprsek 9 a modulační paprsek 4 různé středové vlnové délky jsou spojeny pomocí dichroického zrcadla 8 vybraného na základě jejich optického spektra. Oba jsou zaměřeny na stejné místo fázového modulačního prvku 6 optickým systémem 12. Optický filtr 11 poté modulační paprsek filtruje. Testovací paprsek 9 a modulační paprsek 4 se mohou šířit ve stejném směru nebo v

50

55

protisměru bez jakéhokoli vlivu na výkon systému (zobrazena je verze se stejným směrem šířením). Fázový modulační prvek 6 je umístěn v ohniskové rovině testovacího paprsku 9 a modulačního paprsku 4 kolmo k optické ose testovacího paprsku. Modulační paprsek 4 homogenně osvětluje segment fázového modulačního prvku 6 a ve vrstvě topných mikrozdrojů 3, kterými jsou v tomto příkladu fototermální prvky, vytváří prostřednictvím fototermálního efektu variaci indexu lomu termooptického média. Jelikož testovací paprsek 9 prochází stejným segmentem fázového modulačního prvku 6 s pozměněným indexem lomu, testovací paprsek podstupuje fázový posun odvozený od změny indexu lomu a tloušťky vrstvy termooptického média. Výkon modulačního paprsku 4 je řízen akusticko-optickým modulátorem 10, který ovlivňuje velikost fázového posunu.

Příklad 10

Desátý příklad provedení (obr. 3) využívá jeden z fázových modulačních prvků uvedených na obr. 1a, b, c nebo h a v příkladech 1, 2, nebo 7, ve kterých jsou jako topné mikrozdroje 3 použity fototermální prvky, k vyvolání fázového posunu s prostorovým vzorcem na testovací paprsek 9. Je navržen k tomu, aby prostorově řídil laterální rozložení fázového posunu testovacího paprsku 9. Optický systém 12 se používá pro zaměření modulačního paprsku 4 na fázový modulační prvek 6, zatímco testovací paprsek je kolimován. Akusticko-optický vychylovač 13, umístěný v zadní ohniskové rovině optického systému 12, se používá ke skenování polohy ohniska modulačního paprsku na fázovém modulačním prvku 6. Pro dosažení stabilní distribuce fázového posunu testovacího paprsku musí být skenování polohy modulačního paprsku 4 dostatečně rychlé ve srovnání s časem reakce změny fázového posunu. Uvažujeme-li typický čas reakce fázového modulačního prvku, který je v rozmezí od 1 μ s do 100 μ s, vyžaduje se akusticko-optický vychylovač fungující na frekvencích MHz až GHz, aby splnil požadavek na rychlost obnovy. Během skenování umožňuje akusticko-optický modulátor 10 časově modulovat výkon modulačního paprsku, a tedy generovat 2D vzorec fázového posunu na průřezu testovacího paprsku.

Příklad 11

Jedenáctý příklad provedení (obr. 4) využívá jeden z fázových modulačních prvků uvedených na obr. 1a, b, c nebo h a v příkladech 1, 2, nebo 7 ve kterých jsou jako topné mikrozdroje 3 použity fototermální prvky, k vyvolání fázového posunu s prostorovým vzorcem na průřezu testovacího paprsku 9. Je navržen k tomu, aby prostorově řídil laterální rozložení fázového posunu testovacího paprsku 9. Zde jsou testovací paprsek 9 i modulační paprsek 4 kolimovány a dopadají na fázový modulační prvek 6. Pro vzorování profilu intenzity modulačního paprsku 4 se používá digitální mikrozrcadlové zařízení 14 a variace intenzity modulačního paprsku 4 je zobrazována na fázový modulační prvek 6.

Příklad 12

Dvanáctý příklad provedení je interferenční mikroskop uvedený na obr. 7. Využívá jeden z fázových modulačních prvků uvedených na obr. 1a, b, c nebo h a v příkladech 1, 2, nebo 7. Rovinné rozhraní obsahující rozptylující objekty 19 na povrchu skleněného krycího sklíčka 18 je osvětlováno rovinnou koherentní vlnou 20 vyzařovanou ze světelného zdroje 15, obvykle jednovidovým laserem, a tvoří odražený paprsek od skleněného krycího sklíčka a rozptýlený paprsek z rozptylujícího objektu 19. Odražený paprsek a rozptýlený paprsek jsou zachyceny pomocí zobrazovacího prostředku 17 (obvykle mikroskopového objektivu) a zobrazovány na detektor (např. kamera CMOS) 21, kde se tyto dva paprsky překrývají a interferují. Na zobrazovací cestě paprsku vytvoří odražený paprsek a rozptýlený paprsek dvě optické vlny se stejnou trajektorií skrz optický dělič svazku 16 a optický systém 12, s různými prostorovými profily v průřezu kolmém na dráhu paprsku. Konkrétně v zadní ohniskové rovině mikroskopu je odražený paprsek fokusován do bodu limitovaného difrakcí, zatímco rozptýlený paprsek se šíří jako rovnoběžná vlna. Fázový modulační prvek 6 je umístěn v zadní ohniskové rovině zobrazovací cesty paprsku kolmo na směr šíření světla. V poloze fázového modulačního prvku 6 tvoří odražený paprsek a rozptýlený

5 paprsek společně testovací paprsek 9 prostorového modulátoru světla. Modulační paprsek 4 je generován světelným zdrojem 22. Testovací paprsek 9 a modulační paprsek 4 různé středové vlnové délky jsou spojeny pomocí dichroického zrcadla 8 vybraného na základě jejich optického spektra. Oba jsou zaměřeny na stejné místo optickým systémem 12 (např. afokální soustavou
 10 čoček). Optický filtr 11 poté modulační paprsek filtruje. Testovací paprsek 9 a modulační paprsek 4 se mohou šířit stejným směrem nebo v protisměru bez jakéhokoli vlivu na výkon systému (zobrazena je verze se stejným směrem šířením). Modulační paprsek 4 osvětluje segment fázového modulačního prvku 6 a ve vrstvě fototermálních prvků vytváří prostřednictvím fototermálního efektu variaci indexu lomu termooptického média. Jelikož testovací paprsek 9 prochází fázovým
 15 modulačním prvkem 6, odražený paprsek prochází segmentem fázového modulačního prvku 6 se změněným indexem lomu. Část testovacího paprsku odpovídající odraženému paprsku podstupuje fázový posun, který je odvozen od změny indexu lomu a tloušťky vrstvy termooptického média. Výkon modulačního paprsku 4 je řízen akusticko-optickým modulátorem 10, který seřizuje velikost tepelně vyvolaného fázového posunu.

15 Provedení popsaná v této části s odkazem na fototermální prvky lze reprodukovat s elektrotermálními prvky využívající Jouleova jevu nebo indukční paprsek místo modulačního paprsku.

20

Průmyslová využitelnost

Předkládaný vynález nabízí široké spektrum průmyslového využití zejména v pokročilé technice a moderních zobrazovacích metodách. V současnosti se jedná zejména o vědecké přístroje, jakými
 25 jsou superrozlišovací mikroskopy, holografické mikroskopy a interferenční mikroskopy. Další využití nachází vynález v adaptivní optice, kde doplňuje portfolio dostupných aktivních komponent pro modulaci světelné vlny, které předčí zejména v rychlosti modulace a rozlišení. V neposlední řadě má vynález dopad na moderní metody zpracování 3D obrazu, protože nabízí možnost velmi rychlého skenování fázové, a tedy třírozměrné informace o pozorovaném objektu.

30

Z dlouhodobého hlediska je vynález aplikovatelný v celé řadě nano-věd a bio-věd, zejména pro charakterizaci materiálů a biologických substancí, kdy například může být využit v přístroji pro 3D tomografii buněk pro lékařskou diagnostiku.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Prostorový modulátor světla, **vyznačený tím**, že obsahuje:
 - vrstvu termooptického média, přičemž termooptické médium je alespoň částečně transparentní alespoň pro jednu spektrální složku viditelného nebo blízkého infračerveného světla a má tepelnou vodivost mezi $0,01$ a $30 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ při teplotě $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž uvedená vrstva má tloušťku do $100 \text{ }\mu\text{m}$;
 - alespoň jeden topný mikrozdroj v tepelném kontaktu s vrstvou termooptického média, přičemž každý topný mikrozdroj má alespoň jeden rozměr menší než $10 \text{ }\mu\text{m}$; a
 - alespoň jeden substrát v tepelném kontaktu s termooptickým médiem, přičemž uvedený substrát má termooptický koeficient alespoň 10krát menší, než je termooptický koeficient termooptického média a tepelnou vodivost alespoň $1 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$, přičemž tepelná vodivost substrátu je vyšší než tepelná vodivost termooptického média.
2. Prostorový modulátor světla podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že tloušťka vrstvy termooptického média je do $100 \text{ }\mu\text{m}$.
3. Prostorový modulátor světla podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že tloušťka vrstvy termooptického média je v rozsahu od 1 do $20 \text{ }\mu\text{m}$.
4. Prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že termooptické médium má termooptický koeficient roven nebo vyšší než $8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ při teplotě $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro viditelné světlo.
5. Prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že topnými mikrozdroji jsou fototermální prvky, které jsou v tepelném kontaktu s vrstvou termooptického média, přičemž uvedené fototermální prvky mají alespoň jeden rozměr menší než $10 \text{ }\mu\text{m}$ a absorbují alespoň jednu spektrální složku ultrafialového, viditelného, blízkého infračerveného nebo infračerveného světla.
6. Prostorový modulátor světla podle nároku 5, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje:
 - jeden nebo více světelných zdrojů záření alespoň jedné spektrální složky, která může být absorbována fototermálními prvky; a
 - optický systém obsahující alespoň jeden prostředek na směřování světla, umístěný mezi jedním nebo více světelnými zdroji a fototermálními prvky.
7. Prostorový modulátor světla podle nároku 5 nebo 6, **vyznačující se tím**, že fototermální prvky jsou umístěny na rozhraní substrátu a termooptického média a/nebo rozptýleny v termooptickém médiu a/nebo umístěny v předem stanovené oblasti termooptického média.
8. Prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z nároků 5 až 7, **vyznačující se tím**, že fototermální prvky jsou ve tvaru v podstatě kuliček, polokoulí, tyčinek, krychlí, hvězd, sloupů, disků nebo směsi těchto prvků, nebo jsou fototermální prvky ve formě koloidních částic; přičemž největší rozměr koloidních částic je do $1 \text{ }\mu\text{m}$, výhodně menší než 100 nm ; a přičemž jednotlivé nanočásticové fototermální prvky mají objem v rozsahu od $0,1 \text{ nm}^3$ do $1 \text{ }\mu\text{m}^3$.
9. Prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z nároků 5 až 8, **vyznačující se tím**, že fototermální prvky jsou suspendovány nebo dispergovány ve vrstvě pomocného materiálu, čímž tvoří vrstvu umístěnou na rozhraní substrátu a termooptického média a/nebo umístěnou v předem stanovené oblasti termooptického média, přičemž pomocný materiál je s výhodou vybrán z pevných materiálů, jako jsou sklo typu SF, safír, epoxid, polymethylmethakrylát (PMMA), polyethylmethakrylát (PEMA), *tert*-butyl polyetheretherketon, polydimethylsiloxan (PDMS),

polyvinylchlorid (PVC), polyvinylalkohol (PVA), polystyren, silikon, polykarbonát, urethan-akrylátový elastomer; nebo z kapalných materiálů, jako jsou olej, voda, glycerol, ethylenglykol, diethylenglykol, oktanol, dodekanol.

- 5 10. Prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z nároků 5 až 9, **vyznačující se tím**, že fototermální prvky tvoří kontinuální nebo diskontinuální vrstvu na substrátu, přičemž uvedená vrstva je nanostrukturovaná a/nebo nanovzorovaná, přičemž maximální tloušťka uvedené vrstvy je 10 μm , výhodně 100 nm.
- 10 11. Prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z nároků 1 až 4, **vyznačující se tím**, že topnými mikrozdrci jsou elektrotermální prvky konfigurované pro vyhřívání elektrickým proudem, které jsou v tepelném kontaktu s vrstvou termooptického média, přičemž uvedené elektrotermální prvky mají alespoň jeden rozměr menší než 10 μm a elektrickou vodivost alespoň 100 S/m.
- 15 12. Prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že obsahuje dva substráty, přičemž substráty jsou umístěny na vzájemně protilehlých stranách termooptického média.
- 20 13. Interferenční zobrazovací zařízení, **vyznačující se tím**, že obsahuje:
- zdroj záření testovacího paprsku, který má alespoň jednu spektrální složku;
 - optický dělič nebo segmentované zrcadlo;
 - zobrazovací prostředky;

25 - prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z předcházejících nároků;

 - zobrazovací optický systém, který obsahuje alespoň jednu čočku, zrcadlo a/nebo aperturu, a má zobrazovací rovinu a/nebo zadní ohniskovou rovinu; a
 - detektor,
- 30 přičemž substrát, termooptické médium a alespoň jeden topný mikrozdrci prostorového modulátoru světla jsou uspořádány mezi zobrazovacími prostředky a detektorem, přičemž se zobrazovací rovina nebo zadní ohnisková rovina zobrazovacího optického systému překrývá s polohou prostorového modulátoru světla.
- 35 14. Způsob prostorové fázové modulace testovacího paprsku světla pomocí prostorového modulátoru světla podle kteréhokoliv z nároků 1 až 12, **vyznačující se tím**, že zahrnuje kroky:
- vyžáří se testovací paprsek po osvětlovací optické dráze;
 - testovací paprsek se směřuje přes prostorový modulátor světla podle kteréhokoliv z nároků 1 až 12, přičemž prostorovým modulátorem světla prochází alespoň část testovacího paprsku přes vrstvu termooptického média, a

40 ○ alespoň část testovacího paprsku prochází skrz alespoň jeden substrát a alespoň jeden topný mikrozdrci, nebo

○ testovací paprsek se alespoň částečně odráží na alespoň jednom substrátu nebo alespoň jednom topném mikrozdrci; a

45 - alespoň jeden topný mikrozdrci se zahřeje, čímž se zahřeje i sousední termooptické médium, čímž dojde k lokální změně indexu lomu termooptického média; a v místě ohřevu se tak způsobí posun čela vlny testovacího paprsku prostřednictvím uvedené lokální změny indexu lomu termooptického média.

50 15. Způsob interferenčního zobrazování objektu s nastavitelnou fází testovacího paprsku pomocí prostorového modulátoru světla podle kteréhokoliv z nároků 1 až 12, **vyznačující se tím**, že zahrnuje kroky:

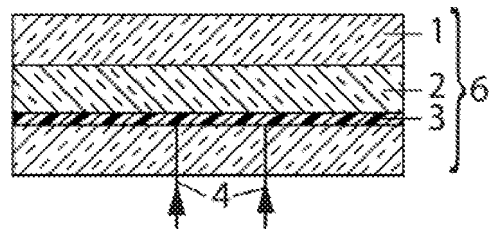
- vyžáří se testovací paprsek po osvětlovací optické dráze, zahrnující alespoň jednu čočku, zrcadlo nebo aperturu;
- testovací paprsek se směřuje skrz zobrazovací prostředky na objekt, čímž se vytvoří odražený nebo procházející paprsek, a rozptýlený paprsek;
- 5 - zachytí se odražený nebo procházející paprsek pomocí zobrazovacích prostředků;
- pomocí stejných zobrazovacích prostředků se zachytí paprsek rozptýlený na objektu;
- zachycený rozptýlený paprsek a zachycený odražený nebo procházející paprsek se vedou prostorovým modulátorem světla, přičemž prostorovým modulátorem světla prochází alespoň část každého uvedeného paprsku přes vrstvu termooptického média; a
- 10 - fáze odraženého nebo procházejícího paprsku se moduluje lokálním optickým nebo elektrickým ohřevem termooptického média pomocí alespoň jednoho topného mikrozdroje.

10 výkresů

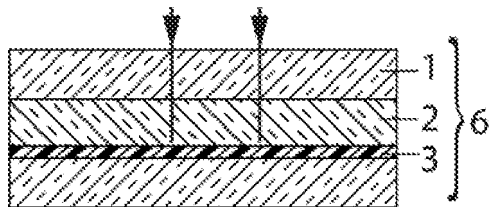
15

Seznam vztahových značek

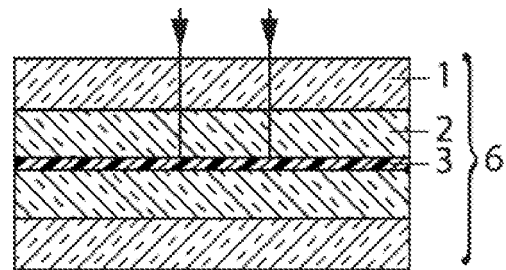
- 1 – substrát
- 2 – termooptické médium
- 20 3 – topné mikrozdroje
- 4 – modulační paprsek
- 5 – odrazivá plocha
- 6 – fázový modulační prvek
- 7 – vrstva pomocného materiálu
- 25 8 – dichroické zrcadlo
- 9 – testovací paprsek
- 10 – akusticko-optický modulátor
- 11 – optický filtr
- 12 – optický systém
- 30 13 – akusticko-optický vychylovač
- 14 – digitální mikrozrcadlové zařízení
- 15 – světelný zdroj osvětlovací vlny interferenčního mikroskopu
- 16 – dělič svazku
- 17 – zobrazovací prostředek
- 35 18 – skleněné krycí sklíčko
- 19 – rozptylující objekty
- 20 – osvětlovací rovinná vlna interferenčního mikroskopu
- 21 – detektor
- 22 – světelný zdroj modulačního paprsku
- 40



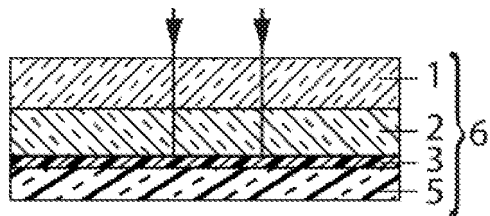
Obr. 1a



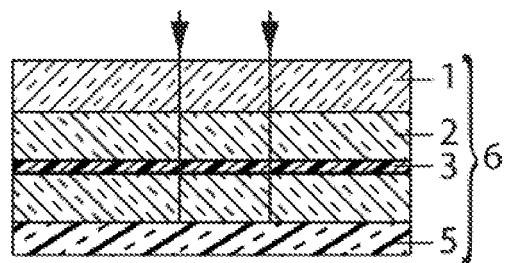
Obr. 1b



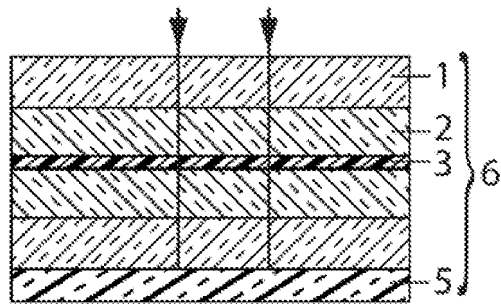
Obr. 1c



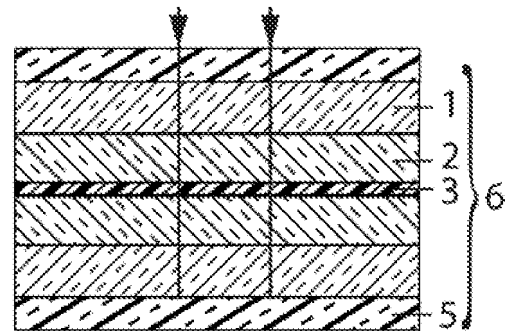
Obr. 1d



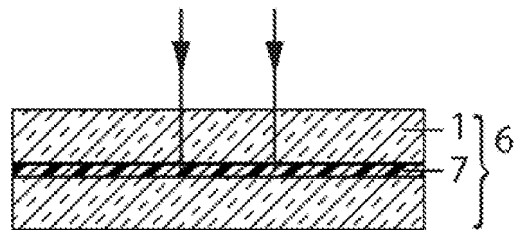
Obr. 1e



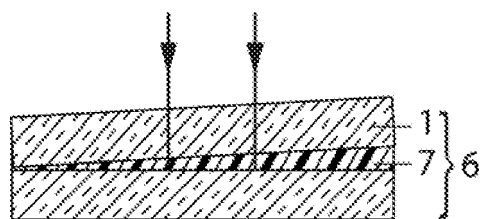
Obr. 1f



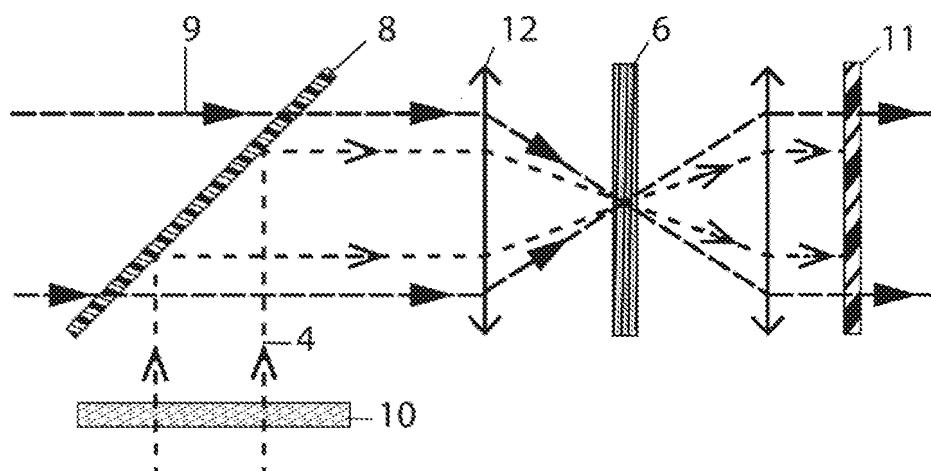
Obr. 1g



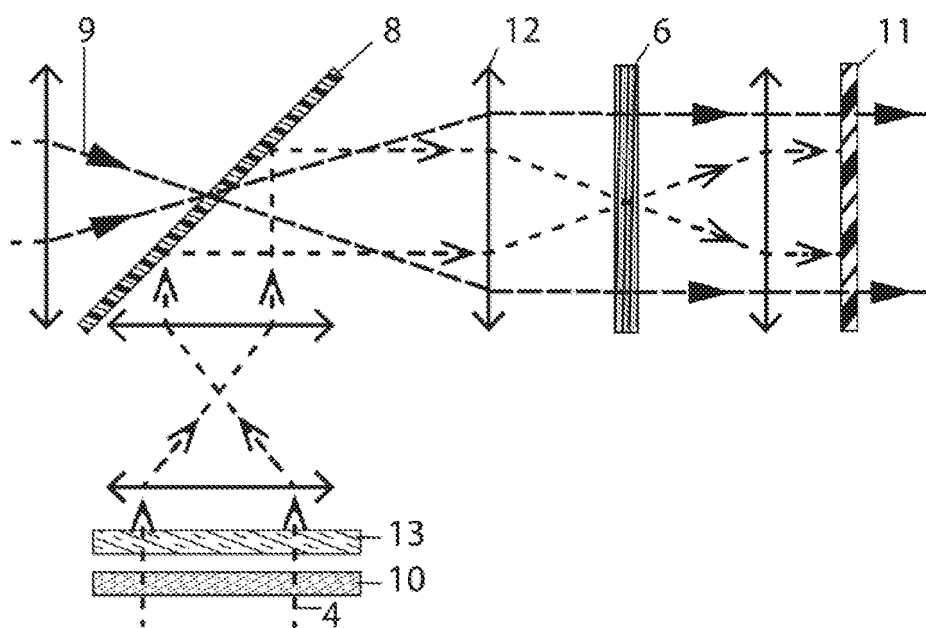
Obr. 1h



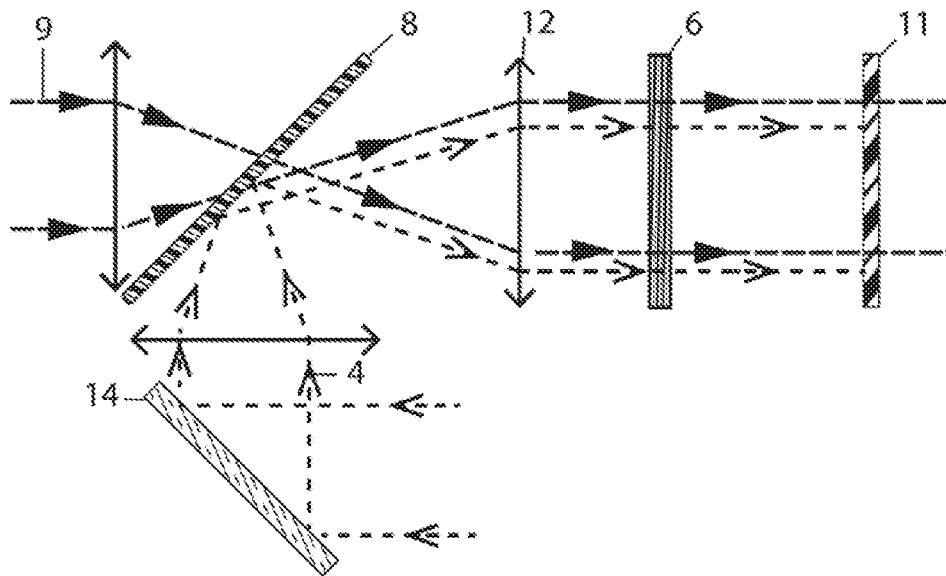
Obr. 1i



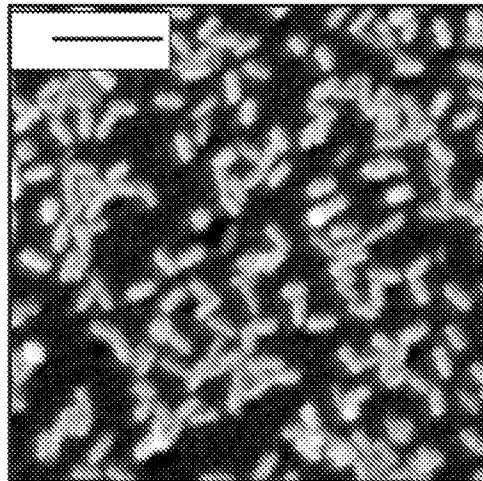
Obr. 2



Obr. 3

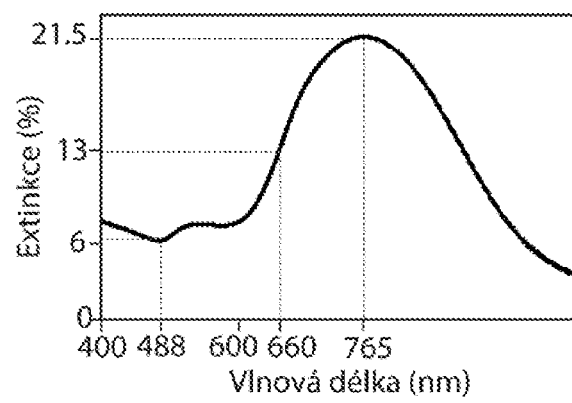


Obr. 4

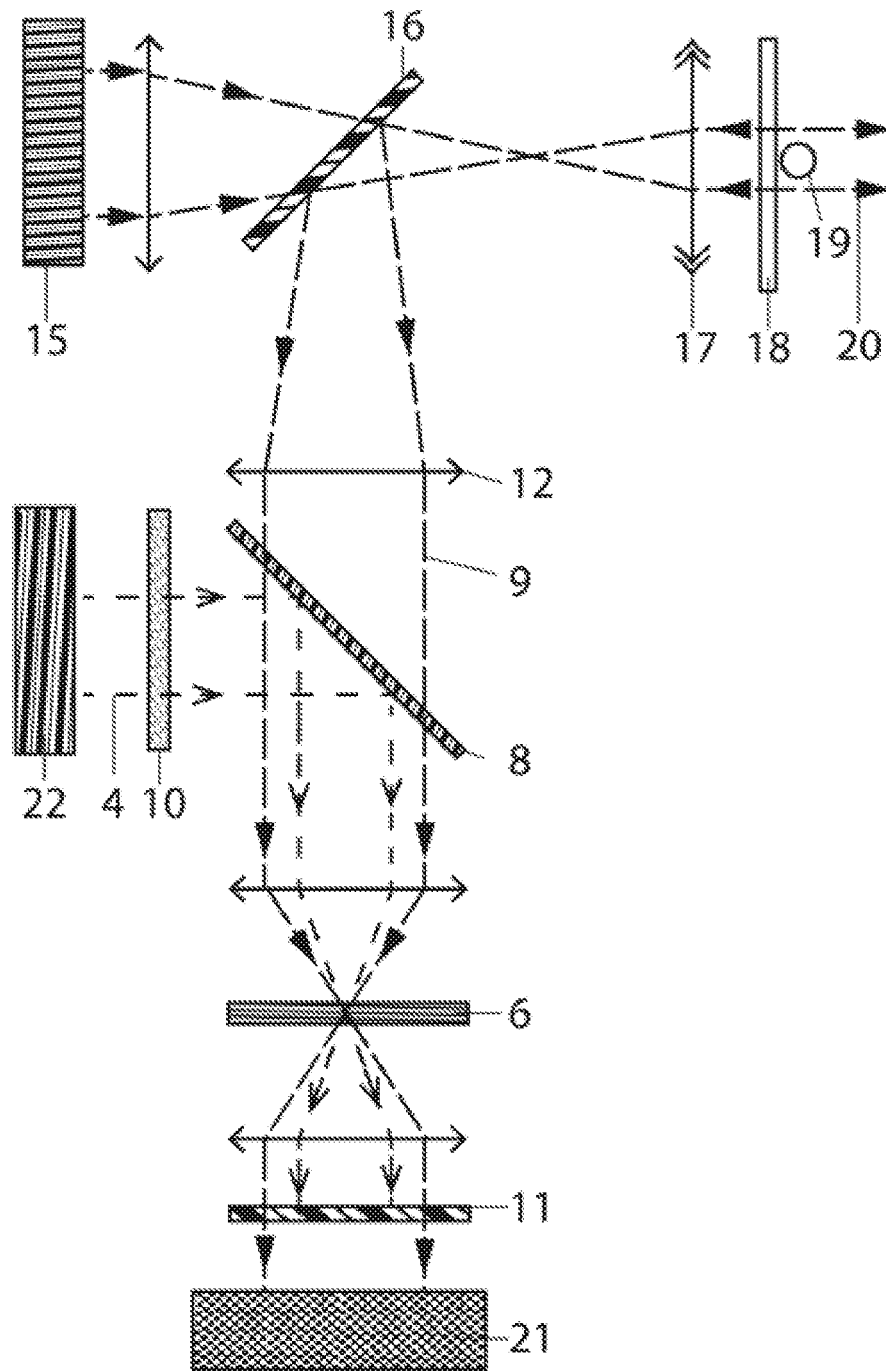


Obr. 5

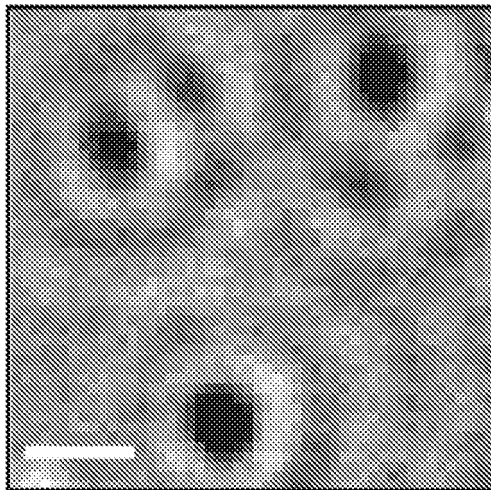
5



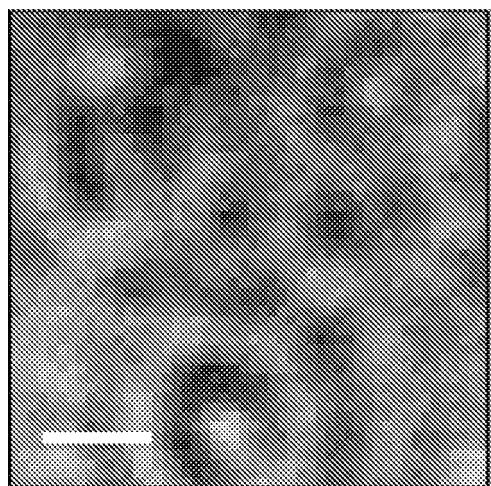
Obr. 6



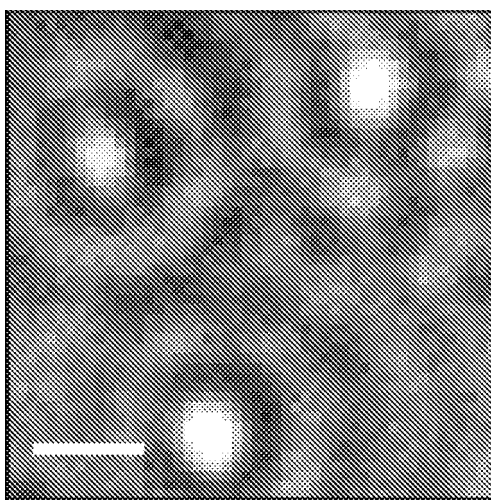
Obr. 7



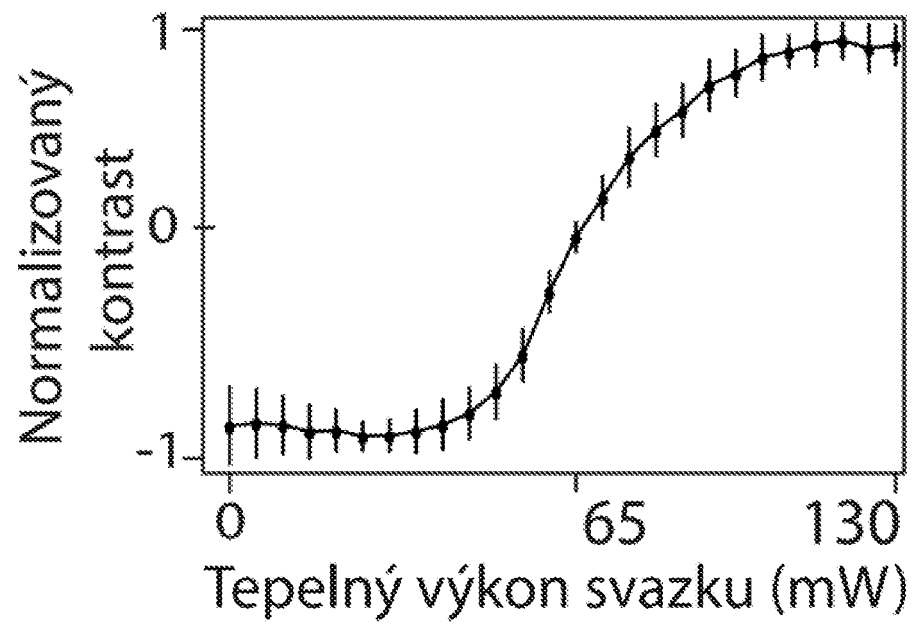
Obr. 8a



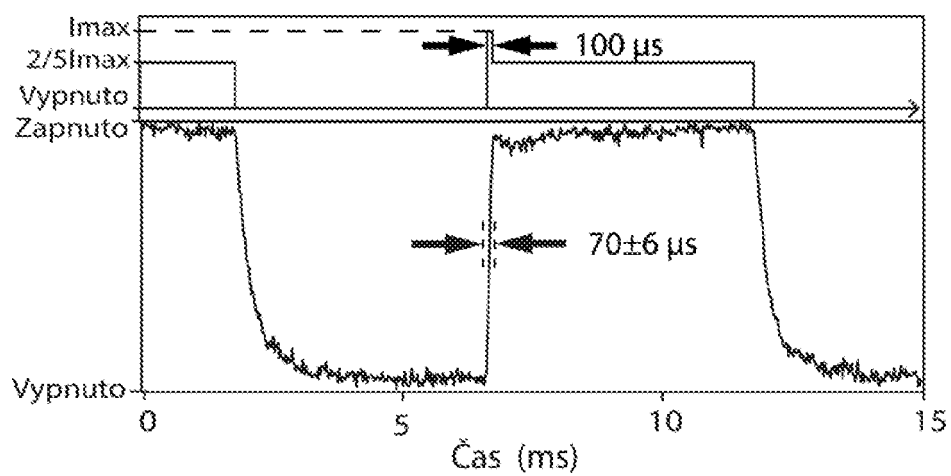
Obr. 8b



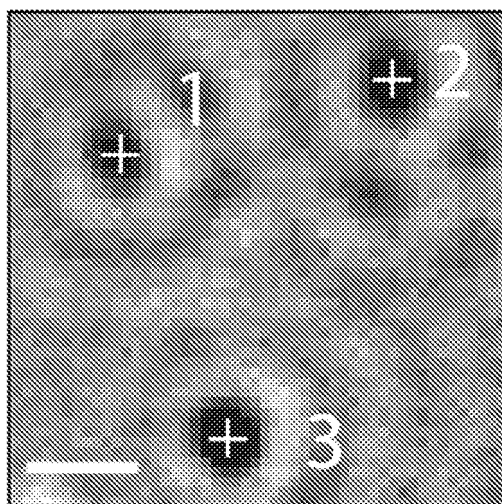
Obr. 8c



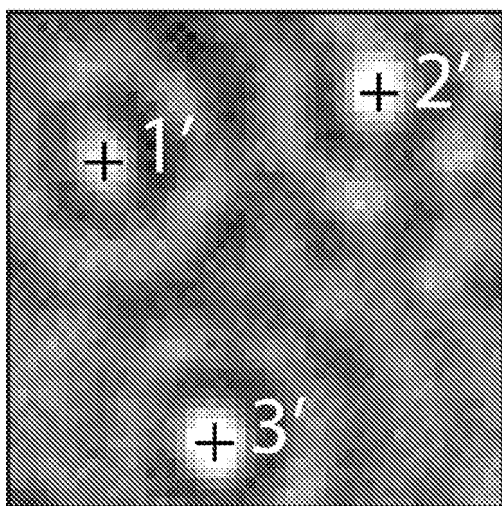
Obr. 9



Obr. 10

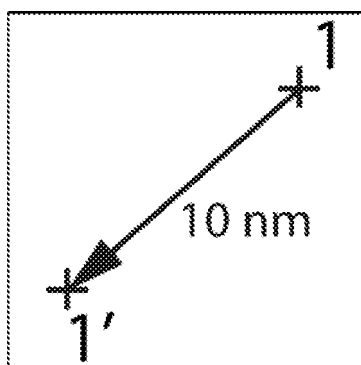


Obr. 11a

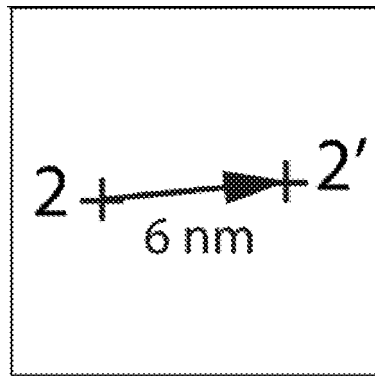


Obr. 11b

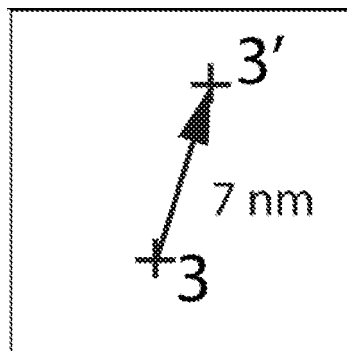
5



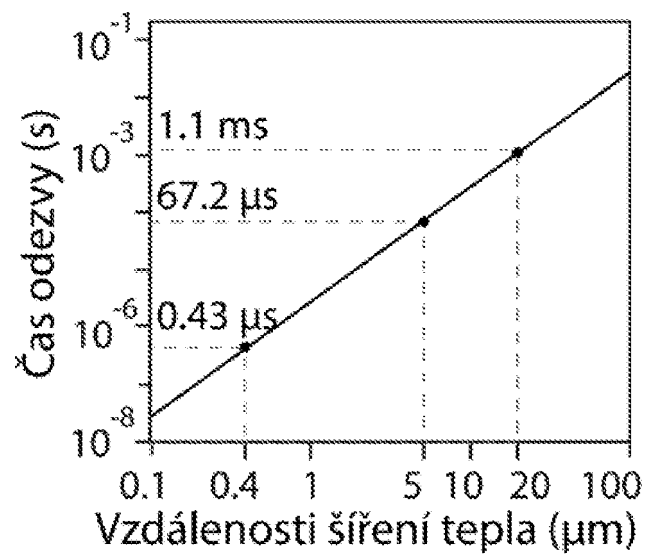
Obr. 12a



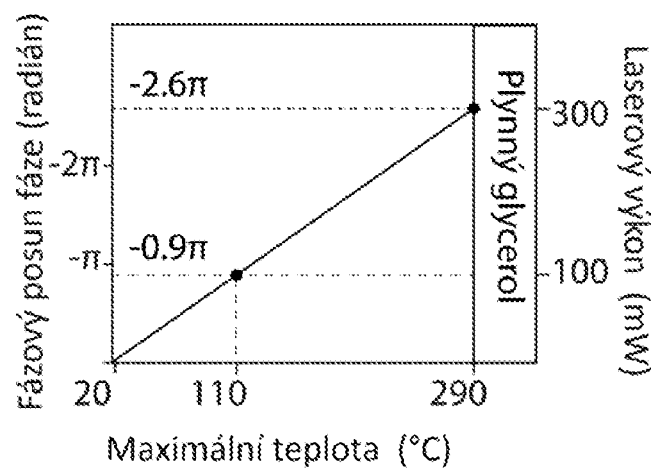
Obr. 12b



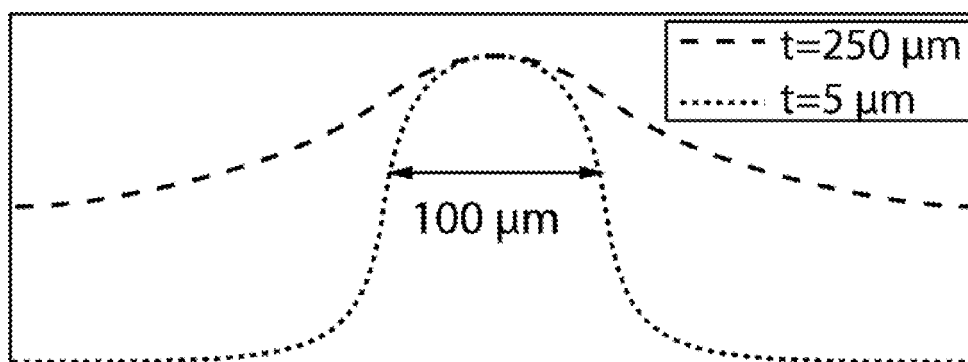
Obr. 12c



Obr. 13



Obr. 14



Obr. 15