

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 245560 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **438386**

(22) Data zgłoszenia: **2021.07.08**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2023.01.09 BUP 02/2023**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2024.09.02 WUP 36/2024**

(51) MKP:

G02B 27/09 (2006.01)

G01N 21/01 (2006.01)

G02B 21/32 (2006.01)

G21K 1/00 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW
TECHNIKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK,
Warszawa, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**FILIPPO PIERINI, Łomianki, PL
KRZYSZTOF ZEMBRZYCKI,
Grodzisk Mazowiecki, PL
SYLWIA PAWŁOWSKA, Gdańsk, PL
PAWEŁ NAKIELSKI, Warszawa, PL
MARCIN TADEUSZ NOWAK, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Mariusz Kondrat, Warszawa, PL

(54) Tytuł:

**System detekcji bazujący na świetle wstecznie odbitym do ogniskowania wiązki
w szczypcach optycznych oraz sposób zwiększenia precyzji pomiaru położenia obiektu
wewnątrz szczypiec optycznych**

PL 245560 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest system detekcji bazujący na świetle wstecznie odbitym do ogniskowania wiązki w szczypcach optycznych oraz sposób zwiększenia precyzji pomiaru położenia obiektu wewnątrz szczypiec optycznych.

Urządzenie ogólnie nazywane szczypcami optycznymi można podzielić na dwa układy optyczne, obydwa złożone z typowych elementów optycznych takich jak lustra, soczewki itp. Przy czym, pierwszy układ odpowiedzialny jest za tworzenie samej pułapki, czyli takie uformowanie geometrii i mocy wiązki lasera aby dany obiekt (np. polistyrenową kulkę o średnicy $1\mu\text{m}$) można było złapać, w określonym miejscu i z dokładnie określoną siłą. Natomiast drugi układ optyczny odpowiedzialny jest za bardzo dokładny pomiar pozycji danego obiektu. Oba układy mogą, ale nie muszą dzielić ze sobą niektóre elementy optyczne (np. obiektyw). Połączenie możliwości manipulowania mikro-obiektami z bardzo małymi siłami, rzędu pN, z jednoczesnym bardzo precyzyjnym pomiarem pozycji, rzędu nm, (na podstawie której obliczana jest wypadkowa siła działająca na obiekt), tworzy unikalne narzędzie używane w wielu dziedzinach nauki. Badania, w których użycie szczypiec optycznych jest konieczne, często skupiają się na interakcjach między złapanym obiektem a innymi obiektami lub medium w pobliżu, z jednoczesnym pomiarem pozycji na podstawie której obliczana jest siła jaka na niego działa. Znane rozwiązania skupiają się na odpowiednim uformowaniu wiązki tworzącej pułapkę, czyli na pierwszym układzie tworzącym szczypce optyczne, np. rozwiązania ujawnione w opisach zgłoszeniowych nr **CN109633858A** lub **CN106932914A**.

Z chińskiego opisu zgłoszeniowego **CN106932914A** znane jest urządzenie do generowania pustej plamki trójwymiarowej matrycy, które zawiera laser, filtr otworowy (z ang. pinhole filter), soczewkę kolimacyjną, płytkę półfalową, przestrzenny modulator światła obciążony trójwymiarowym schematem fazowym tablicy, kołowy konwerter polaryzacji ze spiralną płytką fazową lub konwerter fal świetlnych z kątowym konwerterem polaryzacji, zmieniacz średnicy wiązki oraz obiektyw. Przy czym, laser emituje liniowo spolaryzowaną wiązkę laserową, a filtr otworowy (z ang. pinhole filter) znajduje się na osi optycznej wiązki laserowej, a wiązka laserowa jest filtrowana przez filtr otworowy, po czym czysta wiązka przechodzi przez soczewkę kolimacyjną, gdzie jest kolimowana i rozszerzana w falę płaską.

Fala płaska po przejściu przez płytkę półfalową na tej samej osi co soczewka kolimatora jest modulowana przez modulator światła przestrzennego i odbijana do konwertera fal świetlnych. Następnie przechodzi przez konwerter fal świetlnych i fala świetlna staje się falą świetlną spolaryzowaną kołowo, obciążoną fazą spiralną lub falą świetlną spolaryzowaną kątowo bez fazy spiralnej. Po naładowaniu fali świetlnej spolaryzowanej kołowo fazą spiralną lub fali świetlnej spolaryzowanej kątowo bez obciążenia, faza spiralna jest rozszerzana lub kurczona przez zmieniacz średnicy wiązki i ogniskowana jest przez soczewkę obiektywu.

Natomiast z chińskiego opisu zgłoszeniowego **CN109633858A** znane jest urządzenie i sposób ogniskowania korelacyjnych wiązek światła w pęsetach optycznych. W ujawnionym sposobie, wiązka światła, która jest odbita przez dzielnik wiązki, ze źródła światła przechodzi kolejno przez trzecie zwierciadło i lewą soczewkę ogniskującą, skupia się w otworze (z ang. pinhole), a następnie przechodzi przez prawą soczewkę ogniskującą oraz pierwsze i drugie lustro w kolejności, aby utworzyć pierwszą wiązkę światła w skorelowanych wiązках światła. Wiązka światła, która jest przekazywana przez rozdzielacz wiązki, a źródło światła przechodzi kolejno przez drugie zwierciadło, pierwsze zwierciadło i prawą soczewkę skupiającą, skupia się w otworze, a następnie przechodzi przez lewą soczewkę ogniskującą, trzecie lustro i rozdzielacz wiązki w kolejności, aby utworzyć drugą wiązkę światła w skorelowanych wiązках światła. Położenie otworu (z ang. pinhole) i pierwszego lustra jest regulowane w celu dostosowania błędu odległości wyrównania. Półprzezroczysty arkusz jest umieszczony między dzielnikiem wiązki a drugim lustrem. Położenie drugiego lustra jest regulowane w celu dostosowania błędu kąta ustawienia. Powyższe dwa etapy są na przemian powtarzane, tak że jednocześnie minimalizuje się odległość wyrównania i błędy kąta ustawienia ognisk dwóch korelacyjnych wiązek światła. Dokładność ustawienia ognisk korelacyjnych wiązek światła w pęsetach optycznych jest poprawiona, a urządzenie i sposób mają wartość praktycznego zastosowania. Urządzenie do ogniskowania wiązki w pęsetce optycznej zawiera źródło światła, rozdzielacz wiązki, trzeci odbłyśnik, lewą soczewkę skupiającą, otwór (z ang. pinhole), trójwymiarową platformę regulacji przemieszczenia, prawą soczewkę ogniskującą, pierwszy odbłyśnik, drugie źródło światła, dzielnik wiązki i drugi odbłyśnik. Lustra są ułożone w linii prostej i kolejno rozmieszczone poziomo. Trzecie lustro i pierwsze lustro znajdują się odpowiednio bezpośrednio pod rozdzielaczem wiązki i drugim lustrem. Element marszczący jest umieszczony

między trzecim lustrem a pierwszym lustrem. Urządzenie zawiera lewą soczewkę ogniskującą, otwór i prawą soczewkę ogniskującą rozmieszczone kolejno współosiowo i poziomo; lewa soczewka skupiająca jest umieszczona blisko trzeciego zwierciadła odbijającego, a prawa soczewka skupiająca jest umieszczona blisko pierwszego lustra odbijającego. Otwór jest instalowany na trójwymiarowym stole do regulacji przemieszczenia, a położenie otworu jest regulowane za pomocą trójwymiarowego stołu regulacji przemieszczenia. Pierwsze lustro i drugie lustro są zamontowane na dwuwymiarowej ramie regulacyjnej, pierwsze lustro i drugie lustro reguluje położenie odbłyśnika za pomocą dwuwymiarowej ramy regulacyjnej oraz położenia źródła światła, rozdzielacza wiązki, lewa soczewka ogniskowania i prawa soczewka ogniskowania są stałe. Regulacja położenia pierwszego reflektora i drugiego reflektora obejmuje regulację przemieszczenia i regulację kąta. Korzystnie, otwór jest cylindryczny, średnica otworu jest zgodna ze średnicą talii wiązki w ognisku wiązki, między 0,1 μm a 100 μm ; długość osiowa otworu jest zgodna z odległością Rayleigha w ognisku wiązki, przy 0,1 μm do 100 μm .

W metodzie detekcji pozycji, obiektów w szczypcach, bazującej na świetle odbitym wstecznie, wiązka odbita przechodzi z powrotem przez układ optyczny i pada na detektor pozycji, najczęściej fotodiodę czteropolową. Źródłem światła jest laser, a wiązka jest tak uformowana aby oświetlała relatywnie duży obszar wokół centrum pułapki. Jest to konieczne, ponieważ system musiał działać efektywnie nawet kiedy obiekt odchyli się od centrum pułapki na znaczna odległość, na skutek zewnętrznych sił, bądź na skutek własnych ruchów Browna. Ponieważ profil wiązki jest z reguły gaussowski, faktyczny obszar oświetlony może być większy od złapanego obiektu. To nie stanowi problemu kiedy wokół obiektu nie ma nic, lecz kiedy w systemie są inne obiekty, a tak jest w przypadku np. badan oddziaływań krótko zasięgowych, one również będą odbijały światło które następnie trafi na detektor. To stwarza niepożądane i czasem trudne do stwierdzenia, zakłócenia pomiaru położenia, które są niezwykle trudne jak nie niemożliwe do skompensowania, ponieważ sam detektor nie rozróżnia które światło pochodzi od którego obiektu. Z tego powodu potrzebna jest jakaś forma filtracji sygnałów. Dodatkowo, ponieważ siła interakcji jest obliczana na podstawie pomiaru położenia względem środka pułapki, zniekształcenia sygnału mają bezpośredni wpływ na jakość pomiarów nano i mikro obiektów.

W metodzie bazującej na świetle odbitym wstecznie, obiekty położone blisko złapanego ciała wprowadzają szum do sygnału, poprzez dodatkowe odbicia, w wyniku czego pomiar obarczony jest dużym błędem, co często prowadzi do niemożliwości wykonania wiarygodnego pomiaru. Zatem powstaje konieczność opracowania metody filtrowania tych niepożądanych odbić.

Celem wynalazku jest zapewnienie urządzenia oraz sposobu zwiększającego precyzję pomiaru położenia obiektu w szczypcach optycznych.

Nieoczekiwanie okazało się, że zwiększenie precyzji pomiaru położenia obiektu w szczypcach optycznych można osiągnąć poprzez usprawnienie drugiego układu tworzącego zestaw szczypiec optycznych, czyli układu detekcji położenia złapanego obiektu wewnątrz pułapki.

Przedmiotem wynalazku jest system detekcji bazujący na świetle wstecznie odbitym do ogniskowania wiązki w szczypcach optycznych składający się ze źródła światła, wielu luster, płytki półfalowej, rozdzielacza polaryzacyjnego, obiektywu, detektora oraz dwóch soczewek, charakteryzujący się tym, że jest wyposażony w pochłaniacz, płytkę ćwierćfalową, cel pułapki optycznej oraz w moduł filtracji zbudowany z pierwszej sferycznej soczewki oraz drugiej sferycznej soczewki o wspólnym ognisku, w którym zlokalizowany jest nastawny pinhol; wszystkie elementy optyczne obejmujące źródło światła, wiele luster, płytkę półfalową, płytkę ćwierćfalową, rozdzielacz, sferyczne soczewki, pinhol, obiektyw oraz detektor są ustawione we wspólnej osi optycznej; wiele luster jest ustawione ukośnie w nieliniowym ciągu roboczym, gdzie ciąg roboczy obejmuje kolejno źródło światła w postaci lasera, za którym zlokalizowane jest kolejno pierwsze lustro, nad którym zlokalizowane jest drugie lustro, za którym w linii prostej zlokalizowana jest płytkę półfalowa oraz rozdzielacz polaryzacyjny stanowiące łącznie regulator mocy sprzężony z pochłaniaczem; na wysokości rozdzielacza polaryzacyjnego, ciąg roboczy rozdziela się na dwie odnogi, gdzie w pierwszej odnodze zlokalizowana jest kolejno płytkę ćwierćfalową, za którą znajduje się trzecie lustro, pod którym zlokalizowane jest czwarte lustro, a za nim kolejno obiektyw oraz cel pułapki optycznej; natomiast początek drugiej odnogi ciągu roboczego stanowi piąte lustro zlokalizowane bezpośrednio nad rozdzielaczem polaryzacyjnym, za piątym lustrem w linii prostej ukośnie jest umieszczone szóste lustro, nad którym znajduje się moduł filtracji oraz detektor.

Korzystnie wielkość nastawnego pinhola mieści się w przedziale od 0,02 μm do 2 mm.

Kolejną istotą wynalazku jest sposób zwiększenia precyzji pomiaru położenia obiektu wewnątrz szczypiec optycznych w systemie detekcji według wynalazku bazującym na świetle wstecznie odbitym, charakteryzujący się tym, że obejmuje następujące etapy: kalibrację systemu detekcji obejmującą

ustawienie elementów optycznych obejmujących źródło światła, wiele lusterek, płytkę półfalową, płytkę ćwierćfalową, rozdzielacz, sferyczne soczewki, pinhol, obiektyw oraz detektor we wspólnej osi optycznej; ustawienie wielkości nastawnego pinhola; kalibrację detektora do wybranej wielkości nastawnego pinhola; uruchomienie lasera generującego wiązkę światła, która pada kolejno na pierwsze i drugie lustro, z których jest następnie kierowana na płytkę półfalową i rozdzielacz polaryzacyjny tworzących regulator mocy, gdzie nadmiar mocy jest absorbowany przez pochłaniacz; następnie wiązka przechodzi przez płytkę ćwierćfalową i pada kolejno na trzecie i czwarte lustro, które kierują ją w obiektyw i na cel pułapki optycznej, skąd światło odbite wstecznie jest zbierane przez obiektyw i kierowane kolejno przez czwarte i trzecie lustro na płytkę ćwierćfalową, a następnie pada na rozdzielacz polaryzacyjny; następnie w rozdzielaczu polaryzacyjnym wiązka światła jest odbijana kolejno na piąte i szóste lustro, skąd następnie pada na moduł filtracyjny utworzony z dwóch sferycznych soczewek o wspólnym ognisku, w którym zlokalizowany jest nastawny pinhol; po przejściu przez moduł filtracyjny wyłącznie światło odbite z ogniska w którym znajduje się pinhol jest przekazywane na detektor.

Korzystnie rozmiar nastawnego pinhola jest ustawiany w zakresie od 0,02 μm do 2 mm.

Wynalazek dostarcza wielu korzyści:

- Moduł filtracyjny, bazujący na dwóch sferycznych soczewkach skupiających w konfiguracji konfokalnej, wraz z nastawnym pinholem (tj. otwór o nastawnej wielkości) we wspólnym ognisku, który jest umieszczany w osi optycznej detektora pozycji światła rozproszonego wstecznie, w szczypcach optycznych, zapewnia odfiltrowania szumu oraz interferencji w efekcie znacząco podnosząc rozdzielczość i dokładność pomiaru pozycji i siły;
- System według wynalazku efektywnie ogranicza pole światła wstecznie rozproszonego które dociera do detektora, przepuszczając jedynie to, które pochodzi od obiektu znajdującego się w szczypcach optycznych;
- Pinhol (tj. otwór), dokonujący samej filtracji, wraz z dwiema soczewkami formującymi odpowiedni front falowy, jest nastawny, skokowo bądź płynnie, zapewniając regulację pola widzenia detektora, w zależności od konkretnego pomiaru;
- Uniwersalne zastosowanie - system według wynalazku stosuje się w szczypcach optycznych i może znaleźć zastosowanie w wielu dziedzinach takich jak: badanie reologicznych właściwości pojedynczych komórek, gdzie w warunkach zatłoczonego otoczenia wykonanie precyzyjnego pomiaru jest dużym wyzwaniem (np. reologicznych właściwości fibroblastów, neuronów i astrocytów w celu zmierzenia modułu kompleksu membrana-szkielet); badanie oddziaływań między mikro- i nano-cząsteczkami w przypadkach kiedy odległość między nimi jest o rzędy wielkości mniejsza od ich średnic (np. badanie interakcji między dwoma cząsteczkami o rozmiarze 1000 nm, gdzie jedna przyczepiona jest do manipulatora a druga złapana w pułapce optycznej, a odstępy między nimi wynoszą od 10 μm aż do samego zetknięcia się powierzchni); badanie interakcji między cząsteczką o rozmiarze 1000nm a ścianą mikrokanalu, gdzie złapana cząsteczka jest zbliżana do ściany od odległości 10 μm aż do kontaktu powierzchni, a użycie systemu według wynalazku umożliwia wykonanie pomiaru przy odległościach między cząsteczkami rzędu nanometrów, a badanie zostało wykonane dla różnych koncentracji jonów w płynie, który wypełniał przestrzeń pomiarową; rozciąganie łańcuchów białek i DNA, gdzie w przypadku krótkich łańcuchów, kiedy jeden koniec jest zaczepiony do cząstki w pułapce optycznej, a drugi do manipulatora, kiedy cząstka jest w jego pobliżu, system filtracji eliminuje odbicia od manipulatora i umożliwia wykonanie prawidłowego pomiaru; pomiar relatywnej lepkości roztworów, gdzie poprzez bezpośredni pomiar położenia i obliczając jego autokorelację, można zmierzyć lepkość medium ze złapaną cząstką, przy czym ta metoda jest bardzo precyzyjna i wymaga małych objętości, co jest bardzo istotne w przypadku drogich i trudno dostępnych substancji; mierzenie prędkości za pomocą szczypiec optycznych, gdzie zastosowana metoda bazuje na cząsteczkach zawieszonych w płynie, podobnych do tych używanych w metodach PIV i PTV, a przy użyciu szczypiec optycznych i zastosowaniu filtru Kalmana, można zmierzyć nierówny przepływ w mikroskali, z dużą rozdzielczością czasową i przestrzenną; mieszanie proteinowych motorów, gdzie użycie szczypiec optycznych w systemie według wynalazku jest wykorzystane do mierzenia pojedynczych kroków kinazy na łańcuchu filamentu, niosąc za sobą ładunek, przy czym aplikując naprężenia które redukują ruchy Browna, można zobaczyć że kinaza porusza się ruchem skokowym.

Wynalazek przedstawiono w przykładach wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat systemu detekcji według wynalazku; fig. 2 przedstawia obraz dyfrakcyjny jaki pada na detektor, gdzie A) przedstawia obraz bez filtracji, B) przedstawia obraz przefiltrowany przez moduł filtracyjny systemu według wynalazku.

Przykład 1

System detekcji według wynalazku bazujący na świetle wstecznie odbitym do ogniskowania wiązki w szczypcach optycznych przedstawiono na fig. 1, na której **S1** oznacza laser, **M1** oznacza pierwsze lustro, **M2** oznacza drugie lustro, **P1** oznacza płytkę półfalową, **PBS1** oznacza rozdzielacz polaryzacyjny, **D1** oznacza pochłaniacz, **P2** oznacza płytkę ćwierćfalową, **M3** oznacza trzecie lustro, **M4** oznacza czwarte lustro, **OB1** oznacza obiektyw, **T1** oznacza cel pułapki optycznej, **M5** oznacza piąte lustro, **M6** oznacza szóste lustro, **L1** oznacza pierwszą sferyczną soczewkę, **L2** oznacza drugą sferyczną soczewkę, **PH1** oznacza pinhol (tj. otwór), natomiast **DET1** oznacza detektor.

Jak wskazano na fig. 1, system według wynalazku składa się ze źródła światła, które stanowi laser **S1**, wielu lusterek (**M1–M6**), płytki półfalowej **P1**, która z rozdzielaczem polaryzacyjnym **PBS1** tworzy regulator mocy, pochłaniacza **D1** absorbującego nadmiar mocy, płytki ćwierćfalowej **P2**, obiektywu **OB1**, celu pułapki optycznej **T1**, modułu filtracyjnego oraz detektora **DET1**.

W tym nieograniczającym przykładzie wykonania cel pułapki optycznej **T1** stanowiły kulki polistyrenowe o średnicy 1 μm zawieszono w wodzie. Natomiast można zastosować inne cele optyczne.

Przy czym, wszystkie elementy optyczne (tj. źródło światła **S1**, wiele lusterek **M1**, **M2**, **M3**, **M4**, **M5**, **M6**, płytki półfalowa **P1**, płytki ćwierćfalowa **P2**, rozdzielacz **PBS1**, sferyczne soczewki **L1** i **L2**, pinhol **PH1**, obiektyw **OB1** oraz detektor **DET1**) są ustawione we wspólnej osi optycznej. Wiele lusterek, tj. **M1**, **M2**, **M3**, **M4**, **M5**, **M6**, jest ustawione ukośnie w nieliniowym ciągu roboczym, gdzie ciąg roboczy obejmuje kolejno źródło światła w postaci lasera **S1**, za którym zlokalizowane jest kolejno pierwsze lustro **M1**, nad którym zlokalizowane jest drugie lustro **M2**, za którym w linii prostej zlokalizowana jest płytki półfalowa **P1** oraz rozdzielacz polaryzacyjny **PBS1** stanowiące łącznie regulator mocy sprzężony z pochłaniaczem **D1**, na wysokości rozdzielacza polaryzacyjnego **PBS1**, ciąg roboczy rozdziela się na dwie odnogi, gdzie w pierwszej odnodze zlokalizowana jest kolejno płytki ćwierćfalowa **P2**, za którą znajduje się trzecie lustro **M3**, pod którym zlokalizowane jest czwarte lustro **M4**, a za nim kolejno obiektyw **OB1** oraz cel pułapki optycznej **T1**. Natomiast początek drugiej odnogi ciągu roboczego stanowi piąte lustro **M5** zlokalizowane bezpośrednio nad rozdzielaczem polaryzacyjnym **PBS1**, za piątym lustrem **M5** w linii prostej ukośnie jest umieszczone szóste lustro **M6**, nad którym znajduje się moduł filtracji oraz detektor **DET1**.

Przy czym, moduł filtracji zbudowany jest z pierwszej sferycznej soczewki **L1** oraz drugiej sferycznej soczewki **L2** o wspólnym ognisku, w którym zlokalizowany jest nastawny pinhol **PH1**. Taka konfiguracja działa jak filtr przestrzenny, który przepuszcza tylko światło które zostało odbite z określonego rejonu wokół centrum pułapki optycznej (tj. pinhola) i przekazuje je na detektor **DET1**. Rozmiar rejonu detekcji zależy od rozmiaru pinhola, który w tym przykładzie wykonania jest nastawny w dyskretnych krokach w przedziale od 0.02 μm do 2mm, tak więc system może być ustawiony odpowiednio do wielkości badanego obiektu. Natomiast system według wynalazku umożliwia zarówno skokowy jak i płynny nastaw pinhola **PH1**. A zatem w rozumieniu wynalazku pinhol **PH1** może być skokowo lub płynnie przestrajany w zależności od modelu.

Filtr przestrzenny modułu filtracji działa, ponieważ centrum pułapki znajduje się w ognisku obiektywu **OB1** z korektą na nieskończoność. Światło odbite z ogniska po przejściu przez obiektyw **OB1** wyjdzie w postaci równoległej wiązki promieni, natomiast pozostałe światło już nie. Jeżeli ten zestaw promieni przejdzie przez soczewkę sferyczną skupiającą **L1**, tylko promienie równoległe do osi optycznej zostaną skupione w ognisku, a pozostałe wokół ogniska w zależności jak daleko od osi zostały początkowo odbite. Gdy filtr przestrzenny, w postaci pinhola **PH1**, zostanie umieszczony w ognisku soczewek **L1**, **L2**, promienie poza ogniskiem nie zostaną przepuszczone. Pozostaje jedynie użycie drugiej identycznej soczewki **L2** aby odtworzyć oryginalną postać wiązki, wolnej od niepożądanych zakłóceń, która zostanie skierowana na detektor **DET1**.

Przykład 2

Sposób zwiększenia precyzji pomiaru położenia obiektu wewnątrz szczypiec optycznych w systemie detekcji według wynalazku bazującym na świetle wstecznie odbitym obejmuje kalibrację systemu detekcji obejmującą ustawienie elementów optycznych (tj. źródło światła **S1**, wiele lusterek **M1**, **M2**, **M3**, **M4**, **M5**, **M6**, płytki półfalowa **P1**, płytki ćwierćfalowa **P2**, rozdzielacz **PBS1**, sferyczne soczewki **L1** i **L2**, pinhol **PH1**,

obiektyw **OB1** oraz detektor **DET1**) we wspólnej osi optycznej, ustawienie wielkości nastawnego pinhola **PH1**, kalibrację detektora **DET1** do wybranej wielkości nastawnego pinhola **PH1**, uruchomienie lasera **S1** generującego wiązkę światła, która pada kolejno na pierwsze **M1** i drugie lustro **M2**, z których jest następnie kierowana na płytkę półfalową **P1** i rozdzielacz polaryzacyjny **PBS1** tworzących regulator mocy, gdzie nadmiar mocy jest absorbowany przez pochłaniacz **D1**. Następnie wiązka przechodzi przez płytkę ćwierćfalową **P2** i pada kolejno na trzecie **M3** i czwarte lustro **M4**, które kierują ją w obiektyw **OB1** i na cel pułapki optycznej **T1**, skąd światło odbite wstecznie jest zbierane przez obiektyw **OB1** i podąża tą samą drogą do rozdzielacza polaryzacyjnego **PBS1**, tj. jest kierowane kolejno przez czwarte **M4** i trzecie lustro **M3** na płytkę ćwierćfalową **P2**, a następnie pada na rozdzielacz polaryzacyjny **PBS1**. Tam wiązka światła jest odbijana kolejno na piąte **M5** i szóste lustro **M6**, skąd następnie pada na moduł filtracyjny utworzony z dwóch sferycznych soczewek **L1**, **L2** o wspólnym ognisku, w którym zlokalizowany jest nastawny pinhol **PH1**. Przejściu przez moduł filtracyjny ulega wyłącznie światło odbite z ogniska w którym znajduje się pinhol **PH1** i jest ono przekazywane na detektor **DET1**.

Przy czym, do każdego pomiaru system według wynalazku musi być wyjustowany i każdy komponent optyczny musi być ustawiony tak, że wszystko znajduje się na wspólnej osi optycznej. Natomiast detektor **DET1** musi być wykalibrowany osobno dla każdej wielkości pinhola **PH1**, z uwagi na fakt że siła sygnału będzie zależała od ilości światła docierającego. W czasie pomiaru wielkość pinhola **PH1** musi być ustalona tak aby zapewnić odpowiedni stosunek sygnału do szumu, jednocześnie nie osłabiając znacząco mocy wiązki. Tak się dzieje w momencie kiedy rejon wokół pułapki optycznej, który jest przepuszczany przez filtr przestrzenny, jest rozmiaru złapanego obiektu. Jednakże kiedy rejon jest zbyt mały, wewnętrzny szum detektora będzie ograniczał rozdzielczość pomiaru, niezależnie od systemu optycznego. Odpowiednie ustawienie zależy od badanego systemu, w szczególności rozmiaru złapanego obiektu, natury spodziewanych źródeł zakłóceń, wibracji obiektu oraz otoczenia, mocy docierającej do detektora itp. i jego dobranie wymaga pewnego doświadczenia.

Przykład działania modułu filtracyjnego przedstawiono na fig. 2 przedstawiającej obraz dyfrakcyjny jaki pada na detektor, gdzie obraz przedstawiony na fig. 2A jest asymetryczny, zniekształcony z powodu obecności ciała obcego w pobliżu złapanego obiektu., co powoduje powstanie błędów pomiaru położenia, praktycznie go uniemożliwiających. Z kolei obraz przedstawiony na fig. 2B, powstały od tego samego obiektu w tych samych warunkach, jest prawie idealnie symetryczny, dzięki filtrowi przestrzennemu systemu według wynalazku z pinholem **PH1** o wielkości 0,3 mm, dzięki czemu pomiar jest wolny od zakłóceń które wcześniej go uniemożliwiały.

Zastrzeżenia patentowe

1. System detekcji bazujący na świetle wstecznie odbitym do ogniskowania wiązki w szczypcach optycznych składający się z źródła światła, wielu lusterek, płytki półfalowej, rozdzielacza polaryzacyjnego, obiektywu, detektora oraz dwóch soczewek, **znamienny tym**, że jest wyposażony w pochłaniacz (**D1**), płytkę ćwierćfalową (**P2**), cel pułapki optycznej (**T1**) oraz w moduł filtracji zbudowany z pierwszej sferycznej soczewki (**L1**) oraz drugiej sferycznej soczewki (**L2**) o wspólnym ognisku, w którym zlokalizowany jest nastawny pinhol (**PH1**); wszystkie elementy optyczne obejmujące źródło światła (**S1**), wiele lusterek (**M1**, **M2**, **M3**, **M4**, **M5**, **M6**), płytkę półfalową (**P1**), płytkę ćwierćfalową (**P2**), rozdzielacz (**PBS1**), sferyczne soczewki (**L1**, **L2**), pinhol (**PH1**), obiektyw (**OB1**) oraz detektor (**DET1**) są ustawione we wspólnej osi optycznej; wiele lusterek (**M1**, **M2**, **M3**, **M4**, **M5**, **M6**) jest ustawione ukośnie w nieliniowym ciągu roboczym, gdzie ciąg roboczy obejmuje kolejno źródło światła w postaci lasera (**S1**), za którym zlokalizowane jest kolejno pierwsze lustro (**M1**), nad którym zlokalizowane jest drugie lustro (**M2**), za którym w linii prostej zlokalizowana jest płytkę półfalowa (**P1**) oraz rozdzielacz polaryzacyjny (**PBS1**) stanowiące łącznie regulator mocy sprzężony z pochłaniaczem (**D1**); na wysokości rozdzielacza polaryzacyjnego (**PBS1**), ciąg roboczy rozdziela się na dwie odnogi, gdzie w pierwszej odnodze zlokalizowana jest kolejno płytkę ćwierćfalową (**P2**), za którą znajduje się trzecie lustro (**M3**), pod którym zlokalizowane jest czwarte lustro (**M4**), a za nim kolejno obiektyw (**OB1**) oraz cel pułapki optycznej (**T1**); natomiast początek drugiej odnogi ciągu roboczego stanowi piąte lustro (**M5**) zlokalizowane bezpośrednio nad rozdzielaczem polaryzacyjnym (**PBS1**), za piątym lustrem (**M5**) w linii prostej ukośnie jest umieszczone szóste lustro (**M6**), nad którym znajduje się moduł filtracji oraz detektor (**DET1**).

2. System według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wielkość nastawnego pinhola (**PH1**) mieści się w przedziale od 0,02 μm do 2 mm.
3. Sposób zwiększenia precyzji pomiaru położenia obiektu wewnątrz szczypiec optycznych w systemie detekcji bazującym na świetle wstecznie odbitym według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że obejmuje następujące etapy: kalibrację systemu detekcji obejmującą ustawienie elementów optycznych obejmujących źródło światła (**S1**), wiele lusterek (**M1**, **M2**, **M3**, **M4**, **M5**, **M6**), płytkę półfalową (**P1**), płytkę ćwierćfalową (**P2**), rozdzielacz (**PBS1**), sferyczne soczewki (**L1**, **L2**), pinhol (**PH1**), obiektyw (**OB1**) oraz detektor (**DET1**) we wspólnej osi optycznej; ustawienie wielkości nastawnego pinhola (**PH1**); kalibrację detektora (**DET1**) do wybranej wielkości nastawnego pinhola (**PH1**); uruchomienie lasera (**S1**) generującego wiązkę światła, która pada kolejno na pierwsze (**M1**) i drugie lustro (**M2**), z których jest następnie kierowana na płytkę półfalową (**P1**) i rozdzielacz polaryzacyjny (**PBS1**) tworzących regulator mocy, gdzie nadmiar mocy jest absorbowany przez pochłaniacz (**D1**); następnie wiązka przechodzi przez płytkę ćwierćfalową (**P2**) i pada kolejno na trzecie (**M3**) i czwarte lustro (**M4**), które kierują ją w obiektyw (**OB1**) i na cel pułapki optycznej (**T1**), skąd światło odbite wstecznie jest zbierane przez obiektyw (**OB1**) i kierowane kolejno przez czwarte (**M4**) i trzecie lustro (**M3**) na płytkę ćwierćfalową (**P2**), a następnie pada na rozdzielacz polaryzacyjny (**PBS1**); następnie w rozdzielaczu polaryzacyjnym (**PBS1**) wiązka światła jest odbijana kolejno na piąte (**M5**) i szóste lustro (**M6**), skąd następnie pada na moduł filtracyjny utworzony z dwóch sferycznych soczewek (**L1**, **L2**) o wspólnym ognisku, w którym zlokalizowany jest nastawny pinhol (**PH1**), po przejściu przez moduł filtracyjny wyłącznie światło odbite z ogniska w którym znajduje się pinhol (**PH1**) jest przekazywane na detektor (**DET1**).
4. Sposób według zastrz. 3, **znamienny tym**, że rozmiar nastawnego pinhola (**PH1**) jest ustalany w zakresie od 0,02 μm do 2 mm.

Rysunki

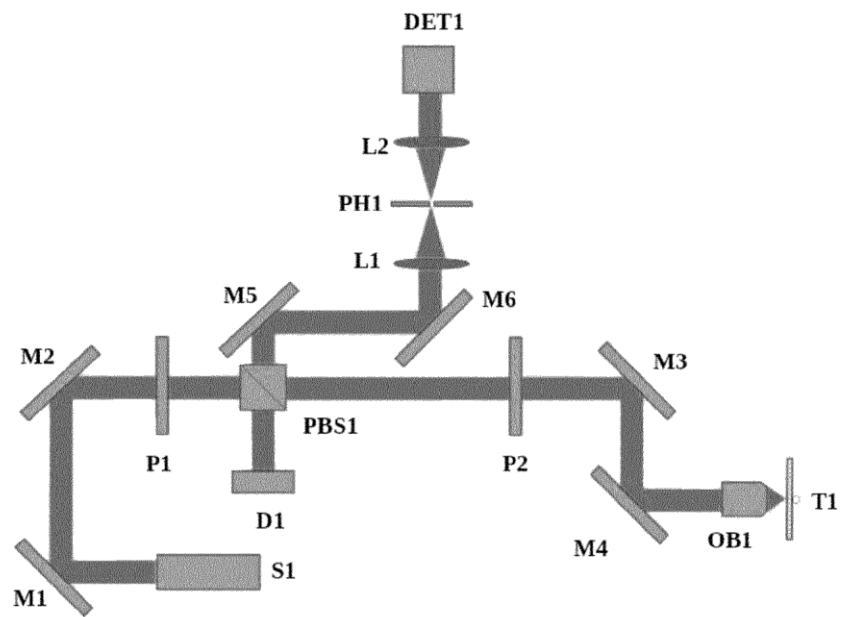
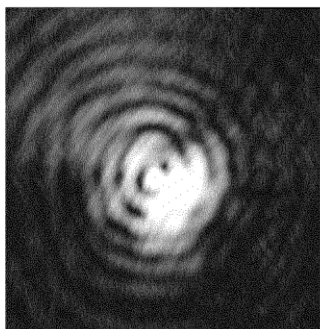


Fig. 1

A)



B)

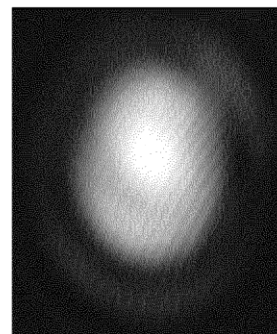


Fig. 2