

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **231034**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **404323**

(22) Data zgłoszenia: **14.06.2013**

(51) Int.Cl.

G01B 9/04 (2006.01)

G01B 21/00 (2006.01)

G01B 7/34 (2006.01)

(54) **Sposób i układ do odwzorowania topografii powierzchni próbki w optycznym mikroskopie skaningowym na wirach optycznych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

07.01.2014 BUP 01/14

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

31.01.2019 WUP 01/19

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wrocław, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

JAN MASAJADA, Nadolice Wielkie, PL

**AGNIESZKA POPIOŁEK MASAJADA,
Nadolice Wielkie, PL**

IRENEUSZ AUGUSTYNIAK, Pawłowice, PL

(74) Pełnomocnik:

rzec. pat. Bartosz Kuriata

PL 231034 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób i układ do odwzorowania topografii powierzchni próbki w optycznym mikroskopie skaningowym na wirach optycznych, stosowanym w badaniach topografii układów scalonych, elementów mikro- i nanomechaniki, powierzchni ciał stałych, materiałów kompozytowych, próbek biologicznych i innych.

Znany jest z polskiego patentu nr 189431 sposób odwzorowania powierzchni w nadrozdzielczym optycznym mikroskopie skaningowym polegający na tym, że wiązkę światła laserowego dzieli się na dwie wiązki, przy czym w wiązce światła przedmiotowej wytwarza się wiry optyczne o znanej charakterystyce, ogniskuje się ją i skanuje badany przedmiot, zaś odbitą wiązkę światła przedmiotową poddaje się interferencji z wiązką światła odniesienia, a otrzymany obraz interferencyjny powiększa się, poddaje detekcji i analizuje, po czym określa się zmianę położenia i geometrii wirów optycznych w odbitej wiązce światła przedmiotowej i wyznacza topografię badanego przedmiotu.

Z tego samego zgłoszenia patentowego znany jest również nadrozdzielczy optyczny mikroskop skaningowy charakteryzujący się tym, że wiązka światła przedmiotowa z pierwszej kostki światłodzielnicej jest kierowana do drugiej kostki światłodzielnicej przez układ generowania wirów optycznych.

Z kolejnego polskiego patentu nr 189432 znany jest sposób odwzorowania powierzchni w nadrozdzielczym optycznym mikroskopie skaningowym polegający na tym, że w wiązce światła laserowego wytwarza się wiry optyczne o znanej charakterystyce, po czym wiązkę dzieli się na dwie wiązki, przy czym wiązkę światła przedmiotową ogniskuje się i skanuje się nią badany przedmiot, zaś odbitą wiązkę światła przedmiotową poddaje się interferencji z wiązką światła odniesienia, a otrzymany obraz interferencyjny powiększa się, poddaje detekcji, analizuje i określa się zmianę położenia i geometrii wirów optycznych w odbitej wiązce światła przedmiotowej oraz wyznacza się topografię badanego przedmiotu.

W tym samym dokumencie patentowym ujawniono nadrozdzielczy optyczny mikroskop skaningowy, który według wynalazku charakteryzuje się tym, że wiązka światła ze źródła światła laserowego (L) jest kierowana do kostki światłodzielnicej (KS) przez układ generowania wirów optycznych (F).

Z polskiego zgłoszenia patentowego nr P 368666 znany jest optyczny mikroskop skaningowy charakteryzujący się tym, że wiązka światła jest kierowana przez pierwszą kostkę światłodzielnicej, drugą kostkę światłodzielnicej, pierwszy filtr i czwartą kostkę światłodzielnicej, zaś wiązka światła z czwartej kostki światłodzielnicej jest kierowana przez piątą kostkę światłodzielnicej na stolik mikroskopowy i do układu rejestrującego. Jednocześnie wiązka światła z pierwszej kostki światłodzielnicej jest kierowana przez pierwszą przesłonę na pierwsze zwierciadło i dalej przez drugi filtr, trzecią kostkę światłodzielnicej, drugie zwierciadło, trzecią przesłonę, czwartą kostkę światłodzielnicej oraz przez piątą kostkę światłodzielnicej na stolik mikroskopowy. Ponadto wiązka światła z drugiej kostki światłodzielnicej jest kierowana przez drugą przesłonę, trzecią kostkę światłodzielnicej, drugie zwierciadło, trzecią przesłonę, czwartą kostkę światłodzielnicej oraz przez piątą kostkę światłodzielnicej na stolik mikroskopowy, przy czym do układu rejestrującego są kierowane zinterferowane wiązki światła odbitego od badanej próbki umieszczonej na stoliku mikroskopu.

Z tego samego zgłoszenia patentowego znany jest też sposób odwzorowania powierzchni w optycznym mikroskopie skaningowym, polegający na tym, że wytwarza się trzy płaskie wiązki światła, z których każdą ogniskuje się i kieruje na badaną próbkę, następnie badaną próbkę skanuje się za pomocą tych trzech wiązek światła, po czym rejestruje się i analizuje interferencyjny obraz wiązek światła odbitych od badanej próbki. Na podstawie przemieszczenia wirów optycznych powstałych w wiązce światła podczas skanowania odwzorowuje się powierzchnię badanej próbki.

Znany jest z polskiego zgłoszenia patentowego nr P388918 sposób skanowania wewnątrz-wiązkowego, wykorzystujący wir optyczny, który polega na tym, że w wiązce światła laserowego generuje się wir optyczny w elemencie generującym wir, przy czym położenie wiru optycznego w wiązce zmienia się poprzez zmianę położenia elementu generującego, po czym ogniskuje się ją w pierwszym obiektywie i kieruje na badany przedmiot, po przejściu wiązki przez badany przedmiot wiązkę z wirami optycznymi obrazowaną w drugim obiektywie, poddaje się detekcji i analizuje.

Z powyższego zgłoszenia patentowego znany jest także układ do skanowania wewnątrz-wiązkowego, który wyposażony jest w laser, za którym wzdłuż wygenerowanej wiązki laserowej ma zestawione element generujący wir optyczny, pierwszy obiektyw, badany przedmiot, drugi obiektyw, element detekujący podłączony do analizatora.

Z publikacji „New scanning technique for the optical vortex microscope”, I. Augustyniak, A. Popiołek-Masajada, J. Masajada, S. Drobczyński, Optical Society of America, 28.03.2012, znany jest sposób

skanowania próbki przy wykorzystaniu mikroskopów nadrozdzielczych na wirach optycznych. W publikacji przedstawiono zachowanie wiru optycznego w płaszczyźnie próbki oraz wyznaczanie geometrii układu pomiarowego. Wprowadzono pojęcie płaszczyzny krytycznej, jako tej, w której punkt osobiwy wiru optycznego porusza się prostopadle do kierunku ruchu elementu generującego wir optyczny. W przypadku układów o łamanym torze optycznym, jak np. układu interferometrycznego, zastosowanego w wynalazku, należy określić kierunek, w jakim porusza się środek ciężkości obrazu przesuwanej przesłony kołowej, wstawionej w miejsce generatora wiru optycznego. Płaszczyzna krytyczna jest tą, w której ruch wiru jest prostopadły do tak wyznaczonego kierunku ruchu środka ciężkości obrazu przesłony kołowej. Pojęcie płaszczyzny krytycznej oraz sposób jej wyznaczania znany jest także z publikacji „Optical vortex scanning in aperture limited system”, A. Popiołek-Masajada, B. Sokolenko, I. Augustyniak, J. Masajada, A. Khoroshun, M. Bacia, Elsevier, 16.11.2013.

Istota sposobu według wynalazku polega na tym, że za pomocą światła emitowanego przez laser, przechodzącego przez filtr polaryzacyjny i układ poszerzania wiązki laserowej, rozdzielanego w pierwszej kostce światłodzielną wiązkę przedmiotową i wiązkę odniesienia, po przejściu wiązki przedmiotowej przez generator wiru optycznego ruchomy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu promienia świetlnego, odbiciu się od pierwszego zwierciadła i przejściu przez obiektyw, skanuje się próbkę umieszczoną na stoliku mikroskopowym w wyznaczonej uprzednio, znanym sposobem, odległości od obiektywu, stanowiącej płaszczyznę krytyczną, pomiędzy obiektywem a mikroskopowym układem powiększającym, po czym powiększa się obraz próbki w mikroskopowym układzie powiększającym i poddaje interferencji w drugiej kostce światłodzielną z wiązką odniesienia, której natężenie jest regulowane w filtrze szarym, a następnie rejestruje się obraz interferencyjny w kamerze, gdzie analizuje się serię uzyskanych obrazów rozkładu fazy, po czym odtwarza się topografię powierzchni badanej próbki, przy czym podczas skanowania światłem lasera przesuwa się stół mikroskopowy, na którym umieszczona jest próbka, skokowo z rozdzielczością od 5 do 250 nm, natomiast generator wirów przesuwa się skokowo z dokładnością nie mniejszą niż 5 μm .

Korzystnie próbkę umieszcza się w odległości od płaszczyzny krytycznej nie większej niż dziesięć długości fali wiązki laserowej od granic próbki.

Korzystnie stół mikroskopowy przesuwa się w każdej z osi, x–y lub z, w stosunku do kierunku biegu promienia świetlnego.

Korzystnie, obiektyw przesuwa się w kierunku równoległym do kierunku biegu promienia świetlnego.

Istota układu według wynalazku polega na tym, że ma źródło światła laserowego, znajdujący się za nim filtr polaryzacyjny i układ poszerzania wiązki laserowej, po którym występuje pierwsza kostka światłodzielną, po pierwszej kostce światłodzielną w gałęzi przedmiotowej znajduje się generator wiru optycznego, ruchomy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu promienia świetlnego, a następnie pierwsze zwierciadło, po którym umieszczony jest obiektyw i próbka, która umieszczona jest na stoliku mikroskopowym, za próbką znajduje się układ powiększający i druga kostka światłodzielną do połączenia wiązki przedmiotowej z wiązką odniesienia, zaś w gałęzi odniesienia za drugim zwierciadłem znajduje się filtr szary, natomiast za drugą kostką światłodzielną umieszczona jest kamera, przy czym układ charakteryzuje się tym, że ma stół mikroskopowy ruchomy w trzech osiach, x–y lub z, w stosunku do kierunku biegu promienia świetlnego i obiektyw ruchomy w kierunku równoległym do biegu promienia świetlnego, a stół mikroskopowy z próbką znajduje się w obszarze pomiędzy mikroskopowym układem powiększającym a obiektywem w wyznaczonej, znanym sposobem, odległości od obiektywu, stanowiącej płaszczyznę krytyczną.

Korzystnie płaszczyzna krytyczna znajduje się nie dalej niż dziesięć długości fali wiązki laserowej od granic próbki.

Zaletą techniczną przedmiotowego rozwiązania jest to, że odwzorowywany jest obraz płaszczyzny, w której leży badany przedmiot, oświetlony zogniskowaną wiązką z wirem optycznym, przez co wpływ dyfrakcji wiązki przechodzącej przez przedmiot zostaje istotnie zmniejszony, co ograniczało zastosowanie znanych mikroskopów na wirach optycznych i innych skaningowych, do badania przedmiotów o prostej strukturze. Ponadto uzyskiwana rozdzielczość przekracza próg wyznaczony przez klasyczną teorię odwzorowania mikroskopowego. Jednocześnie układ ma bardzo prostą budowę, próbka może znajdować się w powietrzu, a odległość między elementami układu a próbką jest, jak na standardy wysokorozdzielczej mikroskopii, bardzo duża. Układ służy także odtworzeniu rozkładu fazy wiązki skanującej w płaszczyźnie znajdującej się bezpośrednio za badaną próbką. Sposób umieszczenia próbki daje również dodatkową możliwość skanowania próbki, która polega na zmianie położenia płaszczyzny krytycznej w obszarze próbki lub jej najbliższym sąsiedztwie. Próbka może być skanowana samym

wirem optycznym poprzez ruch elementu generującego wir optyczny. Technika ta daje możliwość wyznaczania topografii próbki. Technika interferometrii z częstością nośną umożliwia odtworzenie fazy z wystarczającą dokładnością na podstawie jednego interferogramu.

Sposób i układ do odwzorowania topografii powierzchni próbki w optycznym mikroskopie skaningowym na wirach optycznych jest objaśniony w przykładach wykonania i na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat układu, a fig. 2 przedstawia różne możliwe położenia płaszczyzny krytycznej względem badanej próbki.

Przykład 1

Sposób odwzorowania topografii powierzchni w optycznym mikroskopie skaningowym na wirach optycznych polega na tym, że za pomocą światła emitowanego przez laser L, przechodzącego przez filtr polaryzacyjny P i układ poszerzania wiązki laserowej EP, rozdzielanego w pierwszej kostce światłodzieliącej KS1 na wiązkę przedmiotową i wiązkę odniesienia, po przejściu wiązki przedmiotowej przez generator wiru optycznego VL ruchomy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu promienia świetlnego, odbiciu się od pierwszego zwierciadła ZW1 i przejściu przez obiektyw OB, skanuje się próbkę PR, którą umieszcza się na stoliku mikroskopowym SM, w wyznaczonej uprzednio odległości od obiektywu, stanowiącej płaszczyznę krytyczną, pomiędzy obiektywem a mikroskopowym układem powiększającym, po czym powiększa się obraz próbki w mikroskopowym układzie powiększającym i poddaje interferencji w drugiej kostce światłodzieliącej z wiązką odniesienia, której natężenie jest regulowane w filtrze szarym, a następnie rejestruje się obraz interferencyjny w kamerze, gdzie analizuje się serię uzyskanych obrazów rozkładu fazy, po czym odtwarza się topografię powierzchni badanej próbki, przy czym podczas skanowania światłem lasera przesuwają się stolik mikroskopowy, na którym umieszczona jest próbka w osi x-y w stosunku do biegu promienia świetlnego skokowo z rozdzielczością 5 nm, natomiast generator wirów przesuwają się skokowo z dokładnością nie mniejszą niż 5 μm . Położenie płaszczyzny krytycznej wyznacza się metodą znaną ze stanu techniki, zwłaszcza z publikacji przytoczonych na wstępie. Jest ona tą płaszczyzną, w której punkt osiowy wiru optycznego porusza się prostopadle do kierunku ruchu elementu generującego wir optyczny. W przypadku układów o łamanym torze optycznym, jak układu interferometrycznego, zastosowanego w wynalazku, należy określić kierunek, w jakim porusza się środek ciężkości obrazu przesuwanej przesłony kołowej, wstawionej w miejsce generatora wiru optycznego. Płaszczyzna krytyczna jest tą, w której ruch wiru jest prostopadły do tak wyznaczonego kierunku ruchu środka ciężkości obrazu przesłony kołowej.

Przykład 2

Sposób odwzorowania topografii powierzchni próbki jak w przykładzie 1, z tą różnicą, że próbkę PR umieszcza się w odległości od płaszczyzny krytycznej PK równej pięć długości fali wiązki laserowej od granic próbki, natomiast stolik mikroskopowy SM przesuwają się z rozdzielczością 125 nm.

Przykład 3

Sposób odwzorowania topografii powierzchni próbki jak w przykładzie 1 lub 2, z tą różnicą, że stolik mikroskopowy SM przesuwają się w osi z w stosunku do biegu promienia świetlnego i z rozdzielczością 250 nm.

Przykład 4

Sposób odwzorowania topografii powierzchni próbki jak w przykładzie 1, przy czym skanowanie odbywa się poprzez to, że przesuwają się skokowo generator wiru optycznego VL z dokładnością 3 μm .

Przykład 5

Układ do odwzorowania topografii powierzchni w optycznym mikroskopie skaningowym na wirach optycznych ma źródło światła laserowego L, znajdujący się za nim filtr polaryzacyjny P i układ poszerzania wiązki laserowej EP, po którym występuje pierwsza kostka światłodzieliąca KS1, po pierwszej kostce światłodzieliącej KS1 w gałęzi przedmiotowej znajduje się generator wiru optycznego VL, ruchomy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu promienia świetlnego, a następnie pierwsze zwierciadło ZW1, po którym umieszczony jest obiektyw OB i próbka PR umieszczona na stoliku mikroskopowym SM, za próbką PR znajduje się mikroskopowy układ powiększający UM i druga kostka światłodzieliąca KS2 do połączenia wiązki przedmiotowej z wiązką odniesienia, zaś w gałęzi odniesienia za drugim zwierciadłem ZW2 znajduje się filtr szary F, natomiast za drugą kostką światłodzieliącą KS2 znajduje się kamera KM i jest wyposażony w stolik mikroskopowy SM ruchomy w trzech osiach, x-y lub z, w stosunku do kierunku biegu promienia świetlnego i obiektyw OB, który jest ruchomy w kierunku równoległym do biegu promienia świetlnego, a stolik mikroskopowy SM z próbką PR znajduje się w obszarze pomiędzy mikroskopowym układem powiększającym UM

a obiektywem OB w wyznaczonej, znanym sposobem, odległości od obiektywu OB, stanowiącej płaszczyznę krytyczną PK.

Przykład 6

Układ do odwzorowania topografii powierzchni jak w przykładzie 5, z tą różnicą, że płaszczyzna krytyczna PK znajduje w odległości równej pięć długości fali wiązki laserowej od granic próbki PR.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób odwzorowania topografii powierzchni próbki w mikroskopie skaningowym na wirach optycznych, polegający na tym, że za pomocą światła emitowanego przez laser, przechodzącego przez filtr polaryzacyjny i układ poszerzania wiązki laserowej, rozdzielanego w pierwszej kostce światłodzielną na wiązkę przedmiotową i wiązkę odniesienia, po przejściu wiązki przedmiotowej przez generator wiru optycznego ruchomy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu promienia świetlnego, odbiciu się od pierwszego zwierciadła i przejściu przez obiektyw, skanuje się próbkę umieszczoną na stoliku mikroskopowym w wyznaczonej uprzednio, znanym sposobem, odległości od obiektywu, stanowiącej płaszczyznę krytyczną, pomiędzy obiektywem a mikroskopowym układem powiększającym, po czym powiększa się obraz próbki w mikroskopowym układzie powiększającym i poddaje interferencji w drugiej kostce światłodzielną z wiązką odniesienia, której natężenie jest regulowane w filtrze szarym, a następnie rejestruje się obraz interferencyjny w kamerze, gdzie analizuje się serię uzyskanych obrazów rozkładu fazy, po czym odtwarza się topografię powierzchni badanej próbki, **znamienny tym**, że podczas skanowania światłem lasera (L) przesuwa się stół mikroskopowy (SM), na którym umieszczona jest próbka (PR) skokowo z rozdzielczością od 5 do 250 nm, natomiast generator wirów (VL) przesuwa się skokowo z dokładnością nie mniejszą niż 5 μm .
2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że próbkę (PR) umieszcza się w odległości od płaszczyzny krytycznej (PK) nie większej niż dziesięć długości fali wiązki laserowej od granic próbki.
3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stół mikroskopowy (SM) przesuwa się w każdej z osi x-y lub z, w stosunku do kierunku biegu promienia świetlnego.
4. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że obiektyw (OB) przesuwa się w kierunku równoległym do kierunku biegu promienia świetlnego.
5. Układ do odwzorowania topografii powierzchni próbki, do realizacji sposobu określonego w zastrzeżeniach od 1 do 4, w mikroskopie skaningowym na wirach optycznych, mający źródło światła laserowego, znajdujący się za nim filtr polaryzacyjny i układ poszerzania wiązki laserowej, po którym występuje pierwsza kostka światłodzielną, po pierwszej kostce światłodzielną w gałęzi przedmiotowej znajduje się generator wiru optycznego, ruchomy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu promienia świetlnego, a następnie pierwsze zwierciadło, po którym umieszczony jest obiektyw i próbka, która umieszczona jest na stoliku mikroskopowym, za próbką znajduje się układ powiększający i druga kostka światłodzielną do połączenia wiązki przedmiotowej z wiązką odniesienia, zaś w gałęzi odniesienia za drugim zwierciadłem znajduje się filtr szary, natomiast za drugą kostką światłodzielną umieszczona jest kamera, **znamienny tym**, że ma stół mikroskopowy (SM) ruchomy w trzech osiach, x-y lub z, w stosunku do kierunku biegu promienia świetlnego oraz obiektyw (OB) ruchomy w kierunku równoległym do biegu promienia świetlnego, a stół mikroskopowy (SM) z próbką (PR) znajduje się w obszarze pomiędzy mikroskopowym układem powiększającym (UM) a obiektywem (OB) w wyznaczonej, znanym sposobem, odległości od obiektywu (OB), stanowiącej płaszczyznę krytyczną (PK).
6. Układ według zastrz. 5, **znamienny tym**, że płaszczyzna krytyczna (PK) znajduje się nie dalej niż dziesięć długości fali wiązki laserowej od granic próbki (PR).

Rysunki

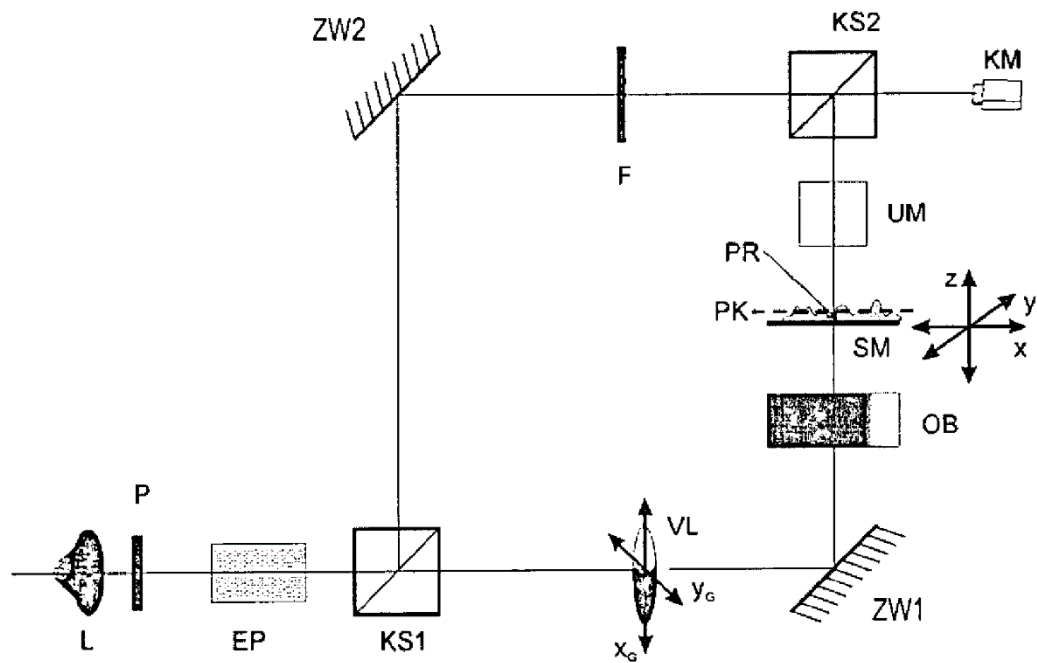


Fig. 1

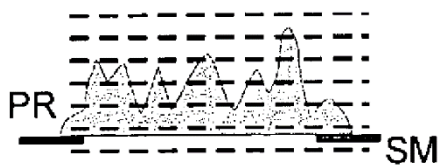


Fig. 2