

Czesław ŁUKIANOWICZ

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY

Modelowanie zjawiska rozpraszania światła w skaterometrii nierówności powierzchni

Dr hab. inż. Czesław ŁUKIANOWICZ

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Od 2001 r. kieruje Zakładem Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji. Specjalizuje się w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni metodami stykowymi i optycznymi. Jest członkiem Sekcji Inżynierii Jakości i Diagnostyki Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.



e-mail: czel@tu.koszalin.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki modelowania zjawiska rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne. Pokazano jak zmienia się zespolona amplituda światła na powierzchni nierównej w zależności od parametrów nierówności okresowych i losowych. Na podstawie uzyskanych wyników przeanalizowano wpływ wysokości oraz kształtu nierówności na rozkład natężenia światła rozproszonego. Przeprowadzone badania modelowe pozwoliły określić zakres wysokości nierówności, które mogą być zmierzone za pomocą metod opartych na ocenie rozkładu natężenia światła rozproszonego. Otrzymane wyniki badań wskazują też, że dla wysokości nierówności znacznie mniejszych od długości fali światła możliwe jest wyznaczenie funkcji gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni, bezpośrednio z rozkładu natężenia światła rozproszonego.

Słowa kluczowe: modelowanie, rozpraszanie światła, powierzchnie chropowate

Modelling of Light Scattering Phenomenon in Scatterometry of Rough Surfaces

Abstract

In the paper numerical results of modelling of light scattering from rough surfaces are presented. Dependency of the complex amplitude of the light wave scattered by rough surface on the surface roughness parameters of periodical and random surfaces is showed. Influence of the surface roughness height and shape on distribution of scattered light is analysed. The model investigations allow determining the roughness height range that we can to measure by differential light scattering methods. Obtained results show that power spectral density of rough surface is similar to distribution of scattered light if the surface roughness height is less than the wavelength of light.

Keywords: modelling, light scattering, rough surfaces

1. Wprowadzenie

W poszukiwaniu szybkich metod oceny i pomiaru nierówności powierzchni wiele uwagi poświęca się w ostatnim czasie metodom optycznym. Są wśród nich także metody oparte na wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne. Zbiór takich metod oraz technik oceny i pomiaru nierówności powierzchni nazywany jest niekiedy skaterometrią nierówności powierzchni [1], [2]. Do zalet metod stosowanych w skaterometrii nierówności powierzchni należy zaliczyć przede wszystkim krótki czas oraz bezstykowy sposób oceny nierówności. Dzięki takim metodom pomiarowym możliwa jest na przykład ocena chropowatości powierzchni podczas ruchu przedmiotu mierzonego [3], [4].

Jednym z warunków zastosowania w praktyce pomiarowej skaterometrii nierówności powierzchni jest przeanalizowanie tzw. zadania prostego. Zadanie to, w ogólnej postaci, polega na wyznaczeniu pola rozproszonego przez powierzchnię nierówną. Do rozwiązania zadania prostego wykorzystuje się istniejące teorie rozpraszania światła – przedstawione między innymi w pracach [5], [6] – oraz opracowane modele rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne [7], [8]. Wszystkie te teorie i modele wymagają na ogół przyjęcia odpowiednich założeń, uproszczeń i warunków ograniczających. W zależności od tego mają one różny stopień skomplikowania oraz zakres zastosowania. Po wyborze określonego modelu rozpraszania światła przez nierówności powierzchni możliwe jest wykonanie modelowych badań symulacyjnych, pozwalających na analizę zadania prostego.

Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy było przeprowadzenie, w ramach optyki falowej, modelowania zadania prostego. W pierwszym etapie badań postanowiono zamodelować rozpraszanie światła przez powierzchnie nierówne oraz przeanalizować, jaką postać przyjmuje zespolona amplituda światła na powierzchni rozpraszającej w zależności od wysokości i kształtu nierówności powierzchni. Następnie przeprowadzono modelowanie kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przez powierzchnie chropowate. Rozkład ten wyznaczano w obszarze Fraunhofera dążąc do tego, aby przeanalizować, jak wpływa wysokość i ukształtowanie nierówności powierzchni na rozkład kątowy natężenia światła rozproszonego.

2. Przyjęty model rozpraszania światła

Przystępując do modelowania rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne oparto się na skalarnej teorii dyfrakcji Kirchhoffa [5], [6], [8], [9]. Założono przy tym, że nominalnie płaska powierzchnia nierówna oświetlana jest płaską falą światła padającą prostopadle na powierzchnię nominalną. W celu uproszczenia analizy, badania rozpoczęto od modelowania rozpraszania światła na powierzchniach dwuwymiarowych. Ponadto przyjęto, że podczas modelowania i analizy pominięte zostaną takie zjawiska towarzyszące rozpraszaniu światła przez powierzchnie nierówne, jak samozacienienia powierzchni i odbicia wielokrotne [5], [6], [9].

Rozpatrzmy jednorodną, nominalnie płaską i całkowicie odbijającą światło powierzchnię nierówną. Niech na powierzchnię tę, opisaną w kartezjańskim układzie współrzędnych $Oxyz$ funkcją

$$z = f(x, y), \quad (1)$$

pada z kierunku z płaska fala światła spójnego o amplitudzie równej jedności i długości fali λ . Wyznamy natężenie światła rozproszonego w obszarze Fraunhofera. Zgodnie z teorią Kirchhoffa, odległość z_0 tego obszaru od powierzchni nierównej spełnia warunek:

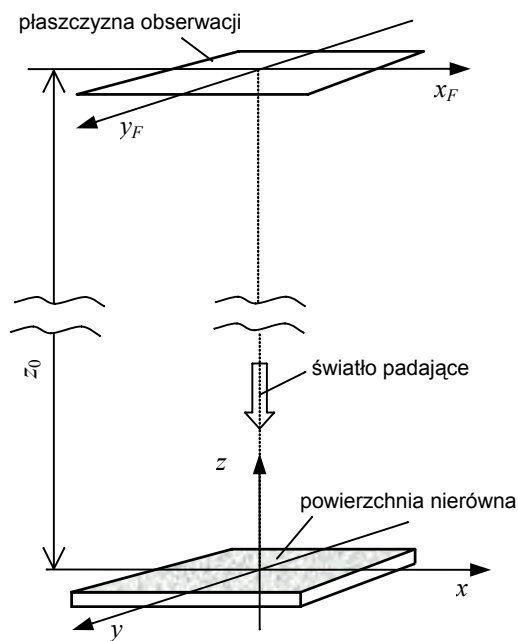
$$z_0 \gg \frac{k(x^2 + y^2)_{max}}{2}, \quad (2)$$

gdzie symbol $k = 2\pi/\lambda$ oznacza liczbę falową. Przeanalizujemy rozkład natężenia światła rozproszonego przez powierzchnię nierówną, występujący w płaszczyźnie prostopadłej do osi Oz ,

położonej w odległości z_0 od powierzchni nierównej, tak jak pokazują to rys. 1. Jak wynika z teorii Kirchhoffa, natężenie światła $I(x_F, y_F)$ w tej płaszczyźnie – nazywanej płaszczyzną obserwacji – jest w przybliżeniu określone równaniem:

$$I(x_F, y_F) = \frac{1}{(z_0 \lambda)^2} \left| \mathfrak{F}[E(x, y)] \right|^2, \quad (3)$$

gdzie: x_F, y_F – współrzędne prostokątne w płaszczyźnie obserwacji zlokalizowanej w obszarze Fraunhofera, \mathfrak{F} – symbol oznaczający operację przekształcenia Fouriera, $E(x, y)$ – zespolona amplituda światła na powierzchni nierównej. Natężenie to jest zatem proporcjonalne do kwadratu modułu transformaty Fouriera zespolonej amplitudy światła na powierzchni nierównej. Równanie (3) wskazuje, że natężenie światła w płaszczyźnie obserwacji jest proporcjonalne do gęstości widmowej mocy zespolonej amplitudy światła na powierzchni nierównej.



Rys. 1. Położenie powierzchni nierównej i płaszczyzny obserwacji
Fig. 1. Position of the rough surface and the observation plane

Przyjmując, że amplitudowy współczynnik odbicia światła w każdym punkcie powierzchni rozpraszającej jest równy jedności, zespolona amplituda $E(x, y)$ na powierzchni nierównej może być wyznaczona na podstawie zależności:

$$E(x, y) = \exp \left[i \frac{4\pi}{\lambda} f(x, y) \right]. \quad (4)$$

Z równania (4) wynika, że rozpatrywana powierzchnia powoduje modulację fazową fali świetlnej, przy czym zmiany fazy światła odbitego są proporcjonalne do wysokości nierówności w danym punkcie powierzchni. Jednakże, w przypadku ogólnym, zespolona amplituda $E(x, y)$ nie zmienia się proporcjonalnie do zmian fazy fali świetlnej odbitej od powierzchni. Można przyjąć, że zespolona amplituda jest w przybliżeniu proporcjonalna do wysokości nierówności jedynie wtedy, gdy długość λ fali światła jest znacznie większa od wysokości z nierówności powierzchni rozpraszającej. W tej sytuacji natężenie światła w płaszczyźnie obserwacji będzie można uznać za proporcjonalne do funkcji gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni. Gęstość widmowa mocy nierówności jest jedną z ważniejszych charakterystyk struktury geometrycznej powierzchni.

3. Badania modelowe

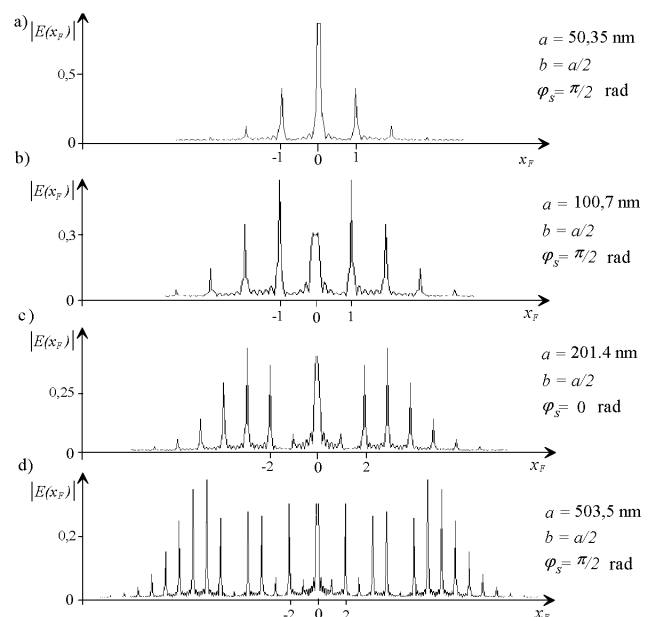
Badania modelowe przeprowadzono korzystając ze specjalnie opracowanego oprogramowania. Umożliwiło ono, zadawanie funkcji określających wysokość nierówności w poszczególnych punktach powierzchni, oraz wyznaczanie zespolonej amplitudy w tych punktach zgodnie z równaniem (4). W kolejnym kroku, zgodnie z opracowaną procedurą modelowania, wyznaczano zespoloną amplitudę światła w płaszczyźnie obserwacji umieszczonej w obszarze Fraunhofera. W tym celu stosowano algorytm szybkiego przekształcenia Fouriera. Następnie, po obliczeniu kwadratu modułu transformaty Fouriera, wyznaczano natężenie światła w płaszczyźnie obserwacji zgodnie z równaniem (3).

Podczas badań modelowych przyjęto, podobnie jak uczyniono to wcześniej, że natężenie fali padającej i amplitudowy współczynnik odbicia światła są równe jedności we wszystkich punktach powierzchni nierównej. Założono także, że długość λ fali światła jest równa 632,8 nm, co odpowiada długości fali światła lasera He-Ne.

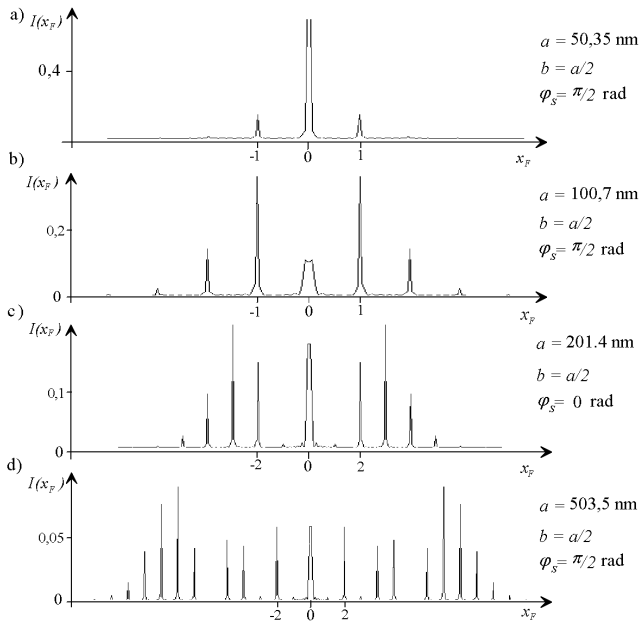
Badania modelowe przeprowadzono na powierzchniach dwuwymiarowych tzn. takich, które spełniają poniższą zależność:

$$z = f(x, y) = f(x). \quad (5)$$

Badano rozpraszanie światła na powierzchniach okresowych, losowych oraz takich, które były superpozycją powierzchni okresowych i powierzchni losowych. Umożliwiło to prześledzenie, w jaki sposób funkcja opisująca wysokość nierówności powierzchni wpływa na rozkład natężenia światła rozproszonego w płaszczyźnie obserwacji. Podczas badań zmieniano amplitudę nierówności okresowych i analizowano wpływ tych zmian na zespoloną amplitudę i natężenie światła w płaszczyźnie obserwacji. Na rys. 2 i rys. 3 przykładowo pokazano rozkłady modułu zespolonej amplitudy oraz natężenia światła rozproszonego otrzymane w wyniku modelowania rozpraszania światła na okresowych powierzchniach sinusoidalnych o różnych amplitudach. Na osiach pionowych podano unormowane wartości modułu zespolonej amplitudy i natężenia światła. Na osiach poziomych $0x_F$ podano numery wybranych maksimum dyfrakcyjnych. Porównanie otrzymanych wyników z wynikami zamieszczonymi w pracach [10] i [11], uzyskanymi dla fazowych sinusoidalnych siatek dyfrakcyjnych, wskazuje na prawidłowo opracowany algorytm modelowania.



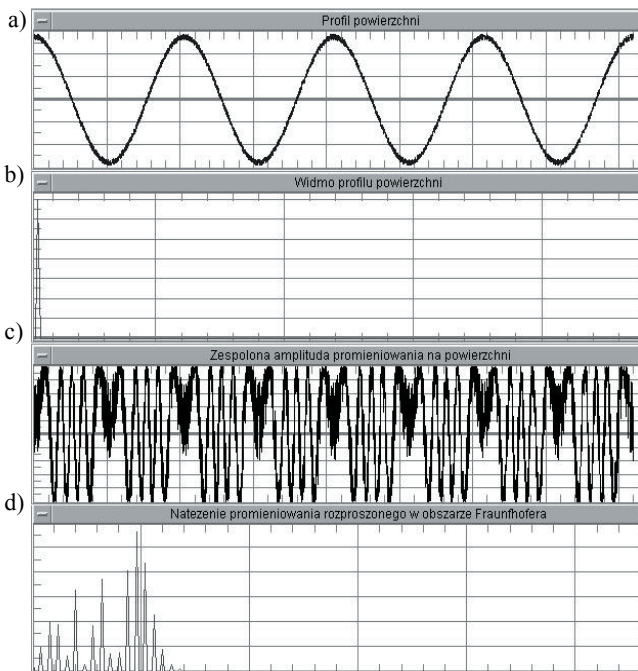
Rys. 2. Modelowane rozkłady zespolonej amplitudy w obszarze Fraunhofera, dla światła rozproszonego przez powierzchnię $z = b + a \sin(x + \varphi_s)$
Fig. 2. Modelled distributions of the complex amplitude in Fraunhofer zone for scattered light from sinusoidal surface $z = b + a \sin(x + \varphi_s)$



Rys. 3. Modelowane rozkłady natężenia światła w obszarze Fraunhofera, dla światła rozproszonego przez powierzchnię $z = b + a \sin(x + \varphi_s)$

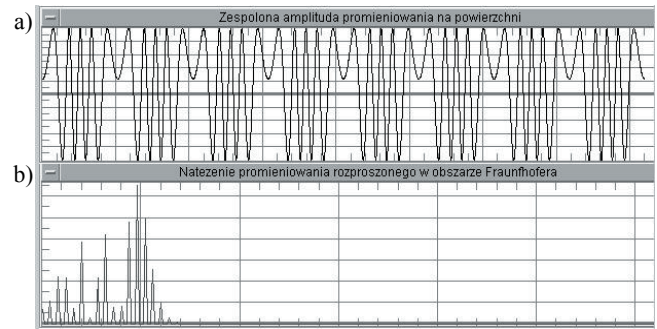
Fig. 3. Modelled distributions of the complex amplitude in Fraunhofer zone for scattered light from sinusoidal surface $z = b + a \sin(x + \varphi_s)$

Zastosowane oprogramowanie umożliwiło modelowanie zarysów zdeterminowanych i losowych oraz dokonywanie ich superpozycji. Ponadto pozwalało ono na wizualizację wyników uzyskanych w kolejnych etapach modelowania. Na rys. 4 pokazano widok ekranu komputera z wynikami modelowania rozpraszania światła przez powierzchnię o zarysie sinusoidalnym (amplituda $a = 1,40 \mu\text{m}$, faza $\varphi_s = \pi/2$ rad) z niewielką składową losową (amplituda $a_r = 65 \text{ nm}$). Widać, że gęstość widmowa mocy zarysu powierzchni (rys. 4b) oraz gęstość widmowa mocy zespolonej amplitudy światła (rys. 4d) znacznie się różnią. Wykresy



Rys. 4. Widok ekranu komputera z wynikami modelowania: a) modelowany sinusoidalny zarys powierzchni z niewielką składową losową, b) gęstość widmowa mocy modelowanego zarysu, c) rzeczywista część zespolonej amplitudy na modelowanym zarysie powierzchni, d) gęstość widmowa mocy zespolonej amplitudy na modelowanym zarysie powierzchni

Fig. 4. View of a computer screen with results of modelling: a) a sinusoidal surface profile with a small random component, b) power spectral density of the modelled surface profile, c) real part of the complex amplitude on the surface profile, d) power spectral density of the complex amplitude on the surface profile



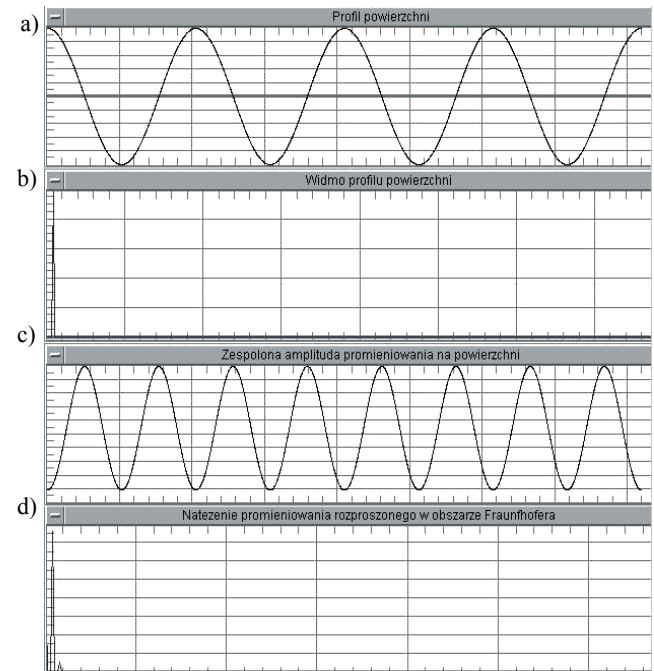
Rys. 5. Widok ekranu komputera z wynikami modelowania rozpraszania światła przez powierzchnię o zarysie sinusoidalnym (bez składowej losowej): a) rzeczywista część zespolonej amplitudy na modelowanym zarysie powierzchni, b) gęstość widmowa mocy zespolonej amplitudy na powierzchni sinusoidalnej

Fig. 5. View of a computer screen with results of modelling: a) real part of the complex amplitude on the sinusoidal surface, b) power spectral density of the complex amplitude on the sinusoidal surface

gęstości widmowej mocy pokazane na rys. 4, 5 i 6, z uwagi na ich symetrię, pokazano tylko dla dodatnich wartości częstotliwości.

Podczas badań stwierdzono, że największy wpływ na rozkład natężenia światła rozproszonego ma skład widmowy zespolonej amplitudy światła na powierzchni rozpraszającej. Zależy on przede wszystkim od wysokości i częstotliwości składowych harmonicznych nierówności powierzchni.

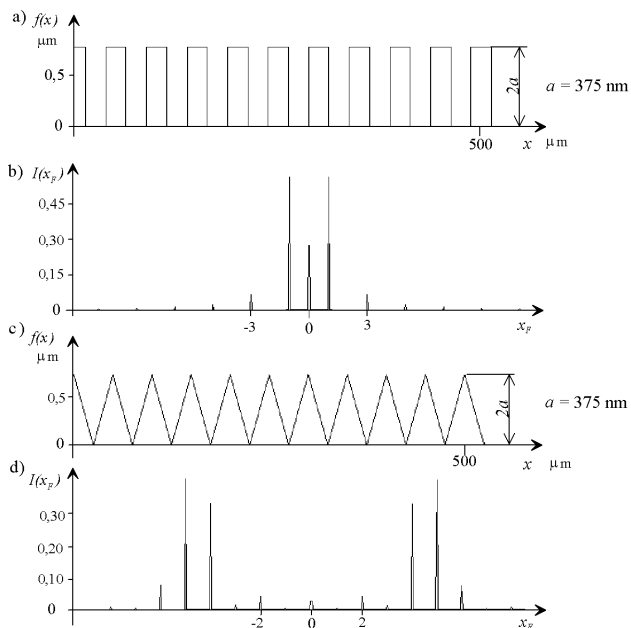
Na rys. 5 pokazano wykres części rzeczywistej zespolonej amplitudy światła na powierzchni o zarysie sinusoidalnym (amplituda $a = 1,40 \mu\text{m}$, faza $\varphi_s = \pi/2$ rad) oraz wykres gęstości widmowej mocy zespolonej amplitudy światła. Wstępne porównanie wykresu pokazanego na rys. 5b z wykresem zamieszczonym na rys. 4d wskazuje, że wykresy te są podobne. Jednakże analiza tych wykresów dokonana przy dużych wzmocnieniach pokazuje, że zakres częstotliwości składowych harmonicznych zespolonej amplitudy z rys. 4c – a zatem i zakres kątów rozproszenia światła – jest znacznie większy niż zespolonej amplitudy z rys. 5a.



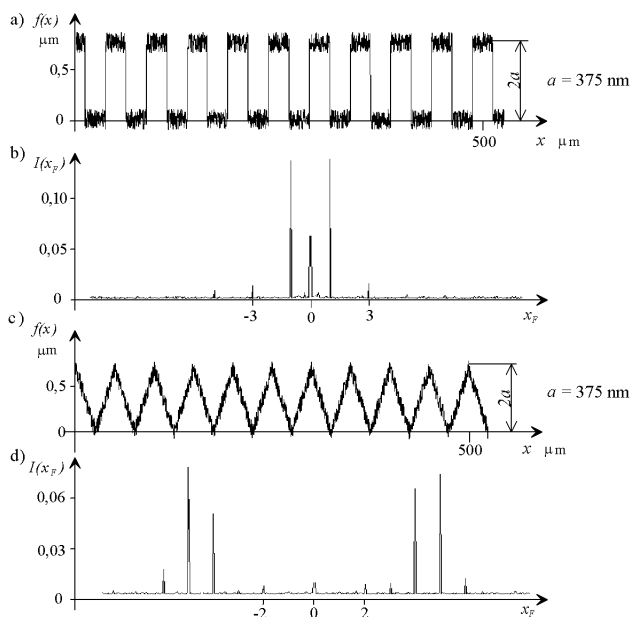
Rys. 6. Widok ekranu komputera z wynikami modelowania: a) modelowany sinusoidalny zarys powierzchni, b) gęstość widmowa mocy modelowanego zarysu, c) rzeczywista część zespolonej amplitudy na modelowanym zarysie powierzchni, d) gęstość widmowa mocy zespolonej amplitudy na modelowanym zarysie powierzchni

Fig. 6. View of a computer screen with results of modelling: a) a sinusoidal surface profile, b) power spectral density of the modelled surface profile, c) real part of the complex amplitude on the surface profile, d) power spectral density of the complex amplitude on the modelled surface profile

Na rys. 6 pokazano podobne wyniki do tych, które ilustruje rys. 4. Otrzymano je dla powierzchni o zarysie sinusoidalnym, bez składowej losowej, przy czym amplituda modelowanego zarysu wynosiła $a = 0,080 \mu\text{m}$, zaś faza była równa $\varphi_s = \pi/2$ rad. Analiza wyników modelowania pokazanych na rys. 6d i rys. 6b prowadzi do wniosku, że w przypadku nierówności powierzchni o amplitudach niewielkich w porównaniu z długością fali światła λ , natężenie światła rozproszonego w przybliżeniu odwzorowuje gęstość widmową mocy nierówności powierzchni. Natomiast porównanie wykresów widocznych na rys. 6c i rys. 5a pokazuje jak zmienia się zespolona amplituda przy zmianie wysokości nierówności.



Rys. 7. Wyniki modelowania rozkładów natężenia światła odbitego od powierzchni o zarysach prostokątnym i piłkowształtnym: a) i c) zarysy powierzchni, b) i d) rozkłady natężenia światła rozproszonego w obszarze Fraunhofera
Fig. 7. Modelled distributions of the light intensity for light reflected from rectangular and saw-tooth surfaces: a) and c) surface profiles, b) and d) intensity distributions of scattered light in Fraunhofer zone



Rys. 8. Wyniki modelowania rozkładów natężenia światła odbitego od powierzchni o zarysach prostokątnym i piłkowształtnym ze składową losową: a) i c) zarysy powierzchni, b) i d) rozkłady natężenia światła rozproszonego w obszarze Fraunhofera
Fig. 8. Modelled distributions of the light intensity for light reflected from rectangular and saw-tooth surfaces with random component: a) and c) surface profiles, b) and d) intensity distributions of scattered light in Fraunhofer zone

Na rys. 7 pokazano wyniki modelowania natężenia światła uzyskane dla powierzchni o innych zarysach okresowych. Jeśli do funkcji, które opisują te zarysy zostanie dodana składowa losowa, to oprócz zmian samego profilu powierzchni, co pokazują rys. 8a i rys. 8c, zmieni się także rozkład natężenia światła rozproszonego. Takie rozkłady, otrzymane w wyniku dodania do zarysów pokazanych na rys. 7a i rys. 7c składowej losowej, pokazano na rys. 8b i rys. 8d. Składowa losowa miała jednostajny rozkład prawdopodobieństwa amplitud, a zakres jej zmienności wynosił ± 100 nm. Dodanie składowej losowej spowodowało, co ilustruje porównanie rys. 7 i rys. 8, kilkukrotne zmniejszenie poziomu natężenia światła w maksimach dyfrakcyjnych oraz pewien wzrost poziomu tła.

Jak wykazały przeprowadzone badania modelowe, dalsze zwiększanie zakresu zmienności składowej losowej powoduje bardzo silne tłumienie maksimów dyfrakcyjnych i jeszcze większy wzrost poziomu tła w płaszczyźnie obserwacji. Na poziomie tła największy wpływ ma stosunek zakresu zmienności składowej losowej do długości fali światła λ . Wzrostowi poziomu tła towarzyszy większe tłumienie maksimów dyfrakcyjnych. Natężenie światła w maksimach dyfrakcyjnych, przy danej długości fali światła, zależy od stosunku amplitudy zarysu okresowego i zakresu zmienności składowej losowej.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że opracowane oprogramowanie jest bardzo przydatne do modelowania rozpraszania światła przez powierzchnie dwuwymiarowe. Uzyskane wyniki wskazują, że metody oceny i pomiaru nierówności powierzchni oparte na wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła mogą być przydatne wówczas, gdy wysokość nierówności powierzchni nie przekracza trzech długości fali światła. Zakres ten zwiększa się nieco dla powierzchni okresowych. Przeprowadzone badania modelowe potwierdzają, że skaterometria nierówności powierzchni jest szczególnie przydatna do oceny powierzchni bardzo gładkich, których wysokość nierówności jest znacznie mniejsza od długości fali światła.

5. Literatura

- [1] Chabros W., Staroński L.: Skaterometria nierówności powierzchniowych. Biuletyn Informacyjny – Optyka, nr 1-2, Instytut Optyki Stosowanej, Warszawa 1993, s. 9-24.
- [2] Łukianowicz Cz.: Analiza dyfrakcji światła laserowego w skaterometrii nierówności powierzchni. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Mechatronika'97”, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Konferencje z. 14, t. II, Warszawa, listopad 1997, s. 825-827.
- [3] Valliant J. G., Foley M. P., Bennett J. M.: Instrument for on-line monitoring of surface roughness of machined surfaces. Optical Engineering, Vol. 39, No. 12, 2000, pp. 3247-3254.
- [4] Łukianowicz Cz., Karpiński T.: Optical system for measurement of surface form and roughness. Measurement Science Review, Vol. 1, No. 1, 2001, pp. 151-154.
- [5] Bass F. G., Fuks I. M.: Rassejaniye voln na statisticeski nerovnoj poverchnosti. Nauka, Moskwa 1972.
- [6] Ogilvy J. A.: Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York 1991.
- [7] Bennett J. M., Mattsson L.: Introduction to Surface Roughness and Scattering. Optical Society of America, Washington D.C. 1989.
- [8] Stover J. C.: Optical Scattering: Measurement and Analysis. McGraw-Hill, Inc., New York 1990.
- [9] Łukianowicz Cz.: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
- [10] Goodman J. W.: Introduction to Fourier Optics. McGraw-Hill Book Co., New York – London 1968.
- [11] Cathey W. T.: Optyczne przetwarzanie informacji. PWN, Warszawa 1978.