



## Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów otrzymanych mikroskopem sił atomowych

M. Szindler <sup>a</sup>, A. Śliwa <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Doktorant Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Studenckie Koło Naukowe Nanotechnologii i Materiałów Funkcjonalnych  
e-mail: marek.szindler@polsl.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów  
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie  
e-mail: agata.sliwa@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy opisano podstawowe możliwości wykorzystania wybranych programów komputerowych służących do analizy i przetwarzania obrazów otrzymanych mikroskopem sił atomowych.

**Abstract:** The paper describes the basic possibility of using selected computer programs used for analyzing and processing images obtained atomic force microscope.

**Słowa kluczowe:** analiza obrazu, mikroskop sił atomowych, program WSxM

### 1. WSTĘP

Analiza obrazu jest to proces przetwarzania informacji, w którym dane wejściowe stanowi obraz, natomiast dane wyjściowe mają formę różną od obrazu. Mogą mieć postać liczby, tablicy liczb, tekstu, decyzji lub czynności. W świetle tej definicji wszystkie istoty żywe, posiadające zmysł wzroku, wykonują analizę obrazu [1].

Z kolei przetwarzanie obrazu to proces przetwarzania informacji, w którym dane zarówno wejściowe, jak wyjściowe mają formę obrazu [1].

Analiza i przetwarzanie obrazu przenikają się wzajemnie. Aby jakiś obraz przeanalizować, trzeba go zwykle najpierw przetworzyć, czyli wyłowić z niego istotne elementy [1].

Podczas analizy obrazu wykorzystuje się wiele, często bardzo skomplikowanych i abstrakcyjnych przekształceń, nieraz powtarzanych wielokrotnie [2, 3].

Pod pojęciem obrazowania należy rozumieć cały szereg zjawisk fizycznych, elektrycznych a następnie operacji matematycznych w wyniku których otrzymujemy sztuczną reprezentację powierzchni w postaci obrazu cyfrowego na ekranie monitora. Analiza obrazów jest jedną

z najważniejszych gałęzi grafiki komputerowej. Jest ona bardzo istotna w wielu dziedzinach nauki i przemysłu: medycynie, biologii, geologii, astronomii, fizyce, chemii i wielu innych. Cele analizy obrazów to:

- wydobywanie cech opisujących obraz (przetwarzanie wstępne),
- rozpoznanie obrazu,
- interpretacja ilościowa i jakościowa [2, 3].

W bogatej literaturze dotyczącej techniki „computer vision” zdefiniowana została wielka różnorodność algorytmów przetwarzania obrazu. Możliwych sposobów przetworzenia jednego obrazu w inny jest nieskończenie wiele, jednak większość nie posiada znaczenia praktycznego. Niemniej jednak pozostała część przekształceń, mogących przynieść praktyczne efekty, jest na tyle liczna, że warto sklasyfikować ją na grupy ze względu na posiadane cechy. Cztery podstawowe grupy przekształceń to:

- przekształcenia geometryczne,
- przekształcenia punktowe,
- przekształcenia kontekstowe,
- przekształcenia widmowe,
- przekształcenia morfologiczne [4].

Trudność analizy polega na tym, że o końcowym sukcesie decyduje właściwa selekcja i kolejność wykonywanych działań (przekształceń) oraz prawidłowy dobór parametrów dla poszczególnych operacji. Dysponując całą gamą różnorodnych narzędzi, doświadczony operator jest w stanie wydobyć z obrazu wiele informacji. Przetwarzanie obrazu nie pozwala na generowanie informacji, a jedynie je przekształca. Można więc mówić o nieograniczonych możliwościach przetwarzania obrazu, ale należy zawsze pamiętać o celu jakiego ma ono służyć. Te nieograniczone możliwości powodują z drugiej strony, że programy do komputerowej analizy obrazu wymagają dużych umiejętności operatora aby próbując wydobyć cenne dane nie stracić bądź niepotrzebnie zmodyfikować – ładny nie zawsze znaczy właściwy.

Procedura odczytu przebiega najczęściej wg następującego planu odczytu danych:

- korekcja tła,
- Filtrowanie Fouriera,
- podbicie kontrastu, nasycenie, krzywe [2, 3].

Ale tak naprawdę nie ma jednego słusznego sposobu postępowania. W sumie to wszystko zależy jaka cecha obrazu nas interesuje w danym momencie.

Dane zebrane podczas pracy mikroskopu w trybie topograficznym zapisywane są w dwóch plikach: pliku binarnym oraz pliku ASCII przechowującym informacje o wszystkich parametrach pomiarów. Format danych binarnych to: 16-bit integer: czyli zakres liczb od -32768 do +32768, z uzupełnieniem do dwóch. W tej notacji przykładowo liczba dziesiętna -32768 będzie miała postać 1000 0000 0000 0000, a liczba +32767 postać 0111 1111 1111 1111. Nasze dane możemy przedstawić za pomocą wyrażenia typu  $T(x, y)$ , czyli macierzy punktów. Aby z takich danych odtworzyć właściwy obraz musimy skorzystać z pliku parametrycznego i znać prawdziwe wartości konkretnych danych:

- Field X size in nm - fizyczna szerokość obrazu,
- Field Y size in nm - fizyczna wysokość obrazu,
- Image size in X - liczba wierszy obrazu,
- Image size in Y - liczba kolumn obrazu.

Dane dotyczące kanału topograficznego:

- Minimum raw value  $r_{\min}$  - minimalna wartość binarna,
- Maximum raw value  $r_{\max}$  - maksymalna wartość binarna,
- Minimal value in physical units  $p_{\min}$  - minimalna wartość fizyczna,
- Maximum value in physical units  $p_{\max}$  - maksymalna wartość fizyczna [2, 3].

Aby policzyć prawdziwą wartość „z” należy skorzystać z formuły:

$$z = p_{\min} + \frac{(r - r_{\min})(p_{\max} - p_{\min})}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (1)$$

Stosując powyższe równanie do wszystkich punktów z wejściowej macierzy danych, dostaniemy macierz punktów - pixeli, czyli obraz cyfrowy. Wartość „z” określa położenie pixela na skali barw, którą po przeskalowaniu możemy identyfikować z wysokością. Położenie punktów w płaszczyźnie obrazu będziemy podawać przez określenie indeksów wiersza i kolumny na przecięciu, których leży [2, 3].

$$\begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & \dots & \dots \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1} & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

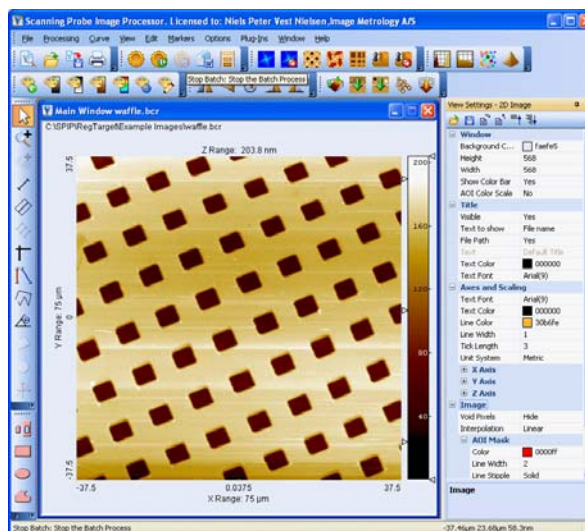
Różnorodność oprogramowań, dostępnych na rynku, umożliwiających obróbkę oraz analizę zdjęć pozwala na wybór takiego, który nam odpowiada i dostosowanego do naszych potrzeb. Wśród szerokiej gamy oprogramowań można wyróżnić między innymi: WSxM, Gwyddion, GSxM, STM IP for Matlab, PYstm, Image Tool, ImageJ, ScienceGl, Scanning Probe Image Processor (SPIP).

## 2. SCANNING PROBE IMAGE PROCESSOR (SPIP)

Ciekawy wydaje się być produkt Duńskiej firmy Image Metrology A/S nazwany Scanning Probe Image Processor (SPIP). Posiada ogromny zestaw narzędzi do analizy, korekcji i przetwarzania zebranych danych między innymi: filtry liniowe i nieliniowe, analizator nierówności, analizę Fouriera, charakterystyki ostrza, korelację uśredniającą, kilka metod korekcji tła i wiele innych rzeczy. Co ciekawe jest również wyposażony w interfejs do pisania własnych funkcji i modułów. Dzięki kompleksowemu zestawowi narzędzi optycznych i analitycznych pozwala, poprzez graficzną poprawę i wyostrenie pewnych elementów, na analizowanie nawet najbardziej skomplikowanych zdjęć Program firmy Image Metrology A/S pomaga w interpretacji powierzchni i przełomów obrazów wykonanych techniką mikroskopii świetlnej, elektronowej i interferencyjnej. Jest szczególnie przydatny w analizie zdjęć uzyskanych na skaningowym mikroskopie elektronowym oraz w spektroskopii tunelowej. Oprócz szczegółowych opisów powierzchni program ten, jest bardzo pomocny w rozpoznawaniu zakłóceń i wibracji pochodzących z otoczenia. SPIP to modułowe oprogramowanie

oferowane jako moduł podstawowy i 14 opcjonalnych dodatków dla konkretnych zastosowań. Obsługuje 77 formatów dla różnego rodzaju przyrządów. Dzięki łatwemu i przejrzystemu menu program staje się prosty nawet dla początkującego użytkownika [2].

Wygląd okna programu po jego uruchomieniu i otwarciu przykładowego zdjęcia pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Widok menu programu po jego uruchomieniu i otwarciu przykładowego obrazu [2]

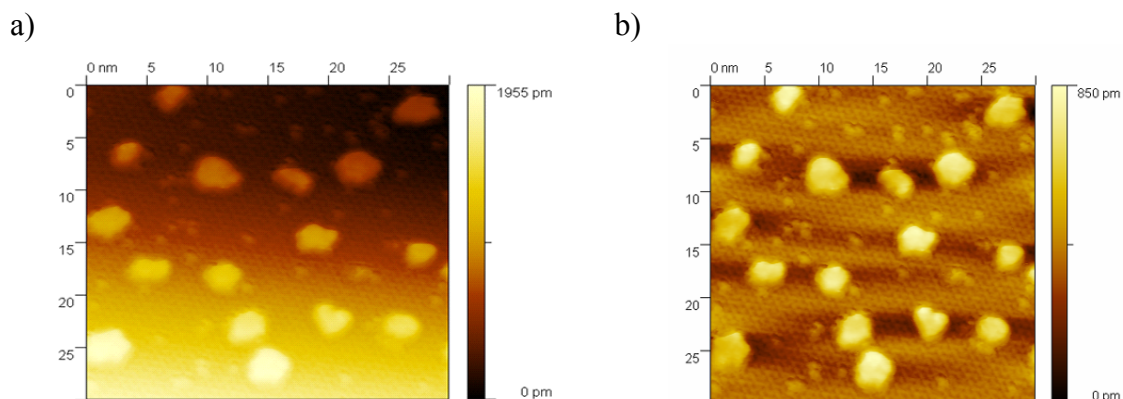
Jedną z pierwszych operacji jaką wykonuje się na surowym obrazie AFM jest korekcja tła. Ma ona na celu usunięcie liniowego bądź nieliniowego zniekształcenia w uzyskanym obrazie, które jest wynikiem pewnych zjawisk występujących podczas skanowania:

- płaszczyzna skanowania - płaszczyzna, po której porusza się koniec ostrza, ma postać łuku. Ostrze nie zawsze jest prostopadłe do badanej powierzchni, szczególnie dla dużych obszarów skanowania, kiedy to skaner musi się dość znacznie odchylić od pionu aby jej dosięgnąć. Jest to tzw. sprzężenie ruchów skanera. Ruch w kierunku x czy y powoduje dodatkowo ruch w kierunku z,
- powierzchnia jest pochyła lub skaner porusza się po torze, który jest pochyły w stosunku do powierzchni, w postaci liniowego tła,
- pełzanie piezoelektryków związane z faktem, że kiedy następuje nagły skok napięcia to skaner nie reaguje natychmiast, a z pewnym opóźnieniem co powoduje przekłamanie wskazań wysokości [2, 3].

W celu korekcji owych zniekształceń stosuje się rozwiązania sprzętowe, programowe jak również ich połączenie. W pracy zostaną opisane tylko procedury numeryczne oferowane przez omawiany program. Ważne jest dobranie właściwej metody do konkretnego rodzaju zniekształcenia. Nie ma jednak, co do tego żadnej reguły. Dlatego bardzo często zachodzi potrzeba sprawdzenia wielu wariantów i kombinacji dostępnych metod. W oparciu o omawiany program możemy stwierdzić że najpowszechniej stosuje się następujące metody korekcji tła:

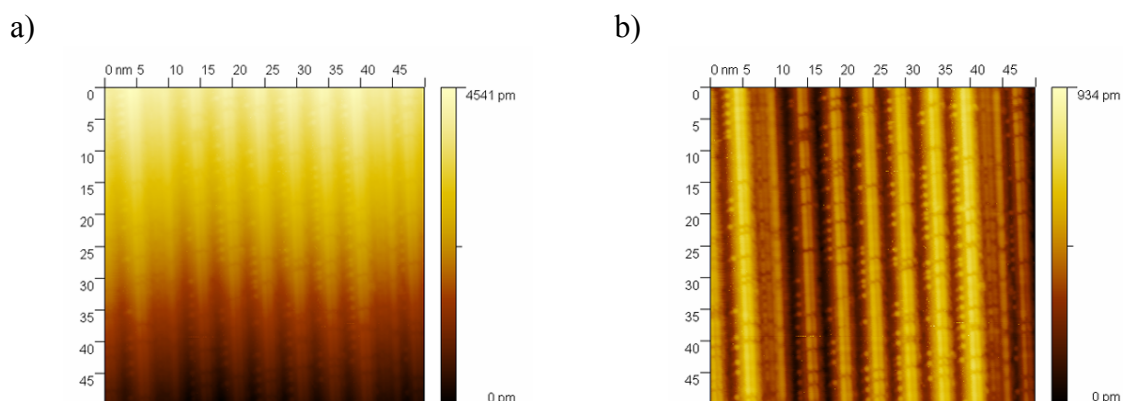
- metoda odcięcia średniej,
- metoda średniego zbocza,
- metoda wpasowania wielomianu [3].

Celem metody odcięcia średniej jest głównie korekcja wyraźnych różnic wysokości, w następujących po sobie liniach obrazu, które mogą się zdarzyć przypadkiem i nie mają charakteru liniowego. Metoda ta polega na obliczeniu średniej wysokości, z każdego wiersza/kolumny, a następnie odjęciu otrzymanych wyników od oryginalnych danych. Przykład podano na rysunku 2.



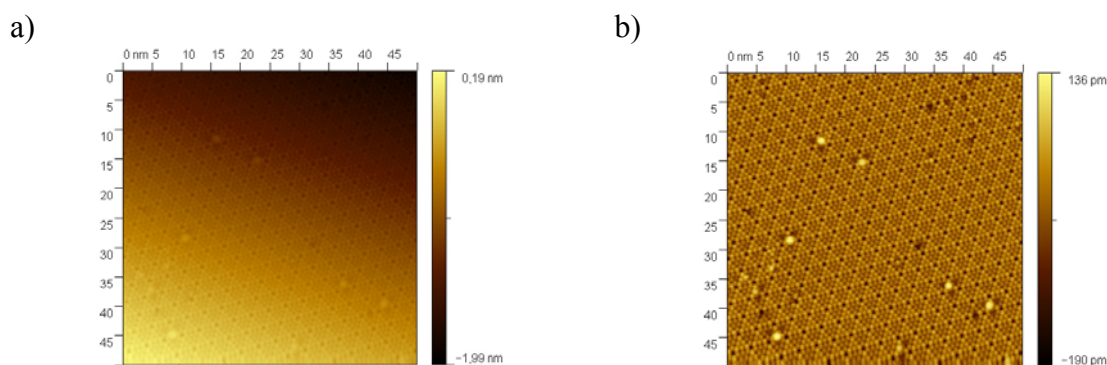
Rys. 2. Obraz powierzchni Si (1 1 1) po naporowaniu Au pokryte wyspami Pb: a) przed korekcją tła, b) po korekcji tła [3]

Metoda odcięcia średniego zbocza polega na obliczeniu średniego gradientu, dla każdego wiersza/kolumny, a następnie odjęciu otrzymanych wartości od odpowiednich wierszy/kolumn danych wejściowych. Metoda generalnie dobrze sprawdza się w przypadku tła większości, ponadto jest mniej drastyczna w działaniu niż metoda odcięcia średniej. Przykład pokazano na rysunku 3.



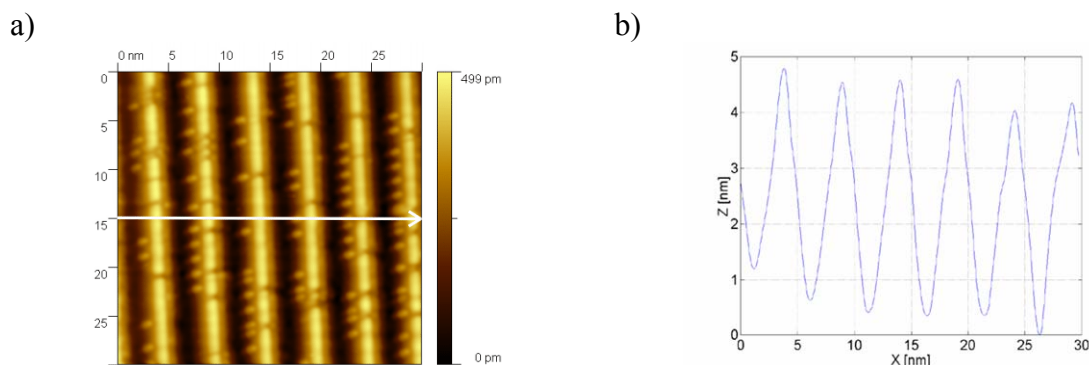
Rys. 3. Obraz powierzchni Si (3 3 5) pokrytej łańcuchami Au: a) przed korekcją tła, b) po korekcji tła [3]

Metoda wpasowania wielomianu jest najbardziej uniwersalna, a polega na wpasowaniu w określone punkty interpolacyjne obrazu wielomianu k-tego stopnia. Przykład pokazano na rysunku 4.



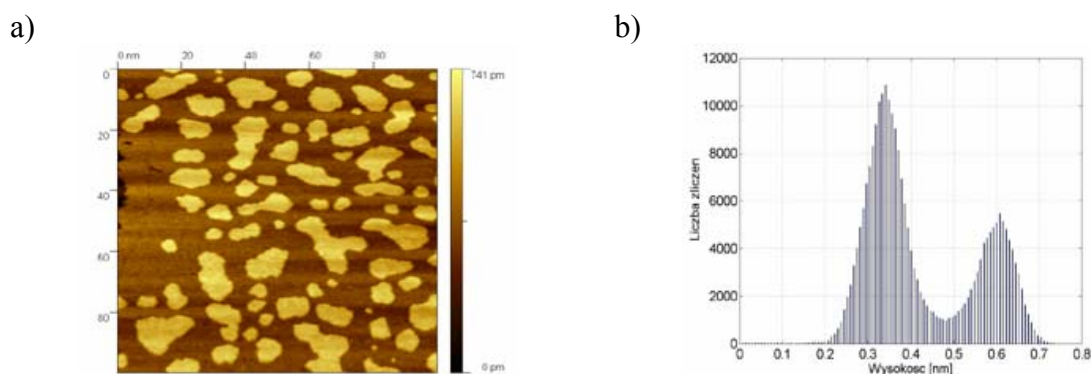
Rys. 4. Obraz powierzchni Si: a) przed korekcją tła, b) po korekcji tła [3]

Inną ważną funkcją programu SPIP jest profil liniowy, która pozwala jak sama nazwa wskazuje, zbadać profil wysokości (jasności pixela) wzdłuż wybranego wiersza x, kolumny y, lub dowolnie poprowadzonej linii [3]. Przykład pokazano na rysunku 5.



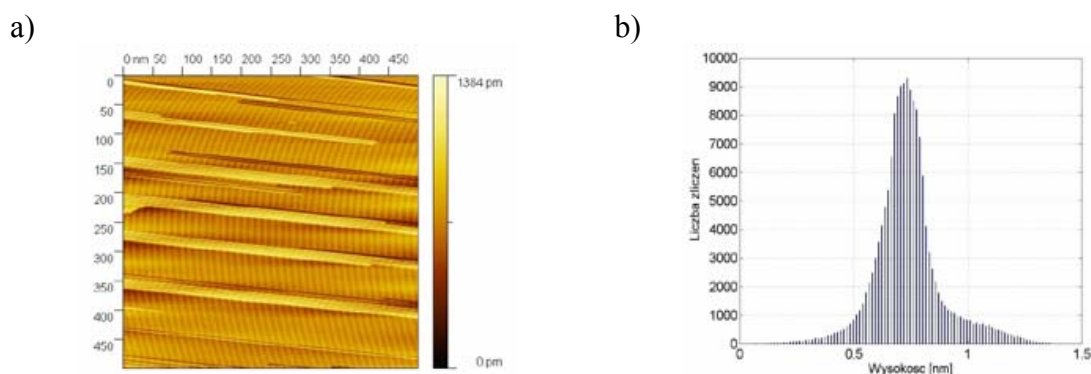
Rys. 5. a) obraz powierzchni krzemu Si (3 3 5) pokrytej łańcuchami Au, b) profil liniowy zmierzony wzdłuż zaznaczonej strzałki [3]

Bardzo ważnym narzędziem do analizy obrazów jest histogram. Pokazuje częstość występowania poszczególnych wartości pixeli w obrazie. W przypadku obrazów z mikroskopu AFM, jest dobrym wskaźnikiem opisującym spłaszczenie powierzchni. Przykład histogramu pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. a) obraz powierzchni Si (1 1 1) pokrytej wyspami Pb, b) histogram tego obrazu [3]

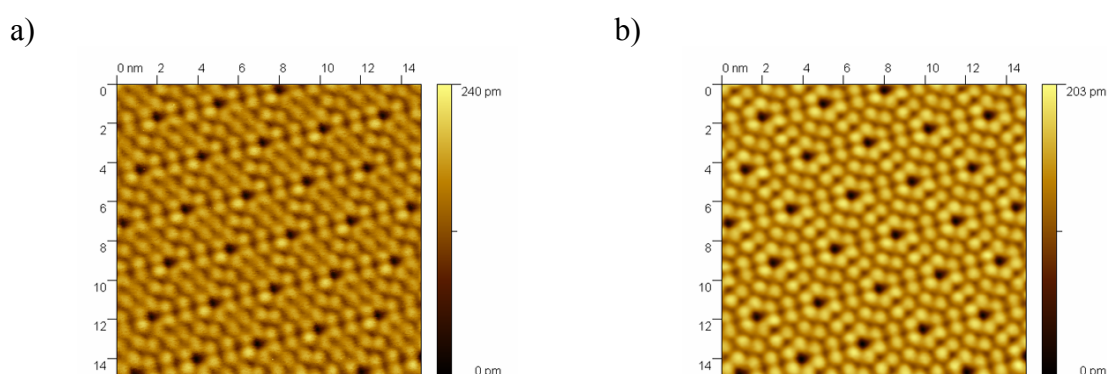
Na rys. 7 możemy zobaczyć jak wygląda histogram powierzchni niemalże płaskiej.



Rys. 7. a) obraz powierzchni Si (5 3 3) pokrytej 0,28 ML Au, b) histogram tego obrazu [3]

Zmienność (przebieg) wielu wielkości fizycznych da się przedstawić w postaci sumy funkcji trygonometrycznych sinus i cosinus. Tego typu operację zmiany danej funkcji na odpowiadającą jej sumę funkcji sinus i cosinus (branych z odpowiednimi amplitudami) nazywamy przekształceniem Fouriera. Podobne przekształcenie można zastosować w odniesieniu do obrazów. Obraz cyfrowy traktujemy wówczas jako funkcję współrzędnych określających położenie danego punktu (pixeli). Następnie funkcję intensywności obrazu przedstawia się jako sumę sinus i cosinus. Ponieważ cały proces wymaga bardzo dużej liczby obliczeń, stosuje się powszechnie algorytm tzw. szybkiej transformaty Fouriera, oznaczanej FFT (ang. *Fast Fourier Transformation*). Algorytm FFT niesie za sobą poważne ograniczenie: obraz musi mieć rozmiar będący potęgą liczby 2, a więc 128, 256, 512, 1024, itd. punktów. Niektóre programy pozwalają na analizę obrazów o innych rozmiarach przez dopełnienie ich np. zerami do rozmiaru wymaganego przy obliczeniach FFT [1].

Na rysunku 8 pokazano przykład obrazu po zastosowaniu filtracji Fouriera za pomocą filtru typu Blackman-Harris.



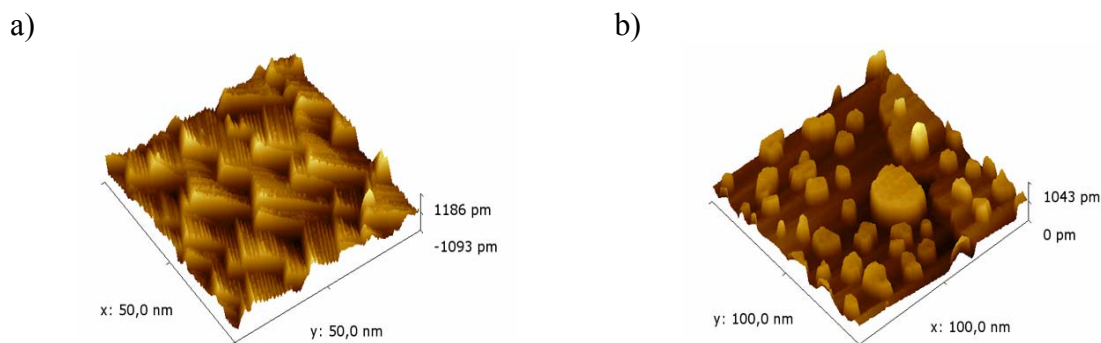
Rys. 8. a) obraz powierzchni Si (1 1 1), b) obraz po filtracji Fouriera za pomocą filtru typu Blackman-Harris [3]

Filtrowanie ma na celu oczyszczenie sygnału z różnego rodzaju szumów. Intuicyjnie zakładamy, że w danym przebiegu czasowym lub przestrzennym mogą istnieć przypadkowe zakłócenia i staramy się je usunąć lub chociaż ograniczyć. Najczęściej filtracja polega

na usunięciu wartości, które uznajemy za zbyt duże lub zbyt małe. Niekiedy jednak używamy jej do wyodrębnienia potrzebnej nam informacji [1]. Możemy wyróżnić kilka odmian filtrów:

- filtry górnoprzepustowe - wyostrzające,
- filtry dolnoprzepustowe – wygładzające,
- wzmacnianie krawędzi metodą Laplace'a,
- wzmacnianie krawędzi metodą gradientu kierunkowego [3].

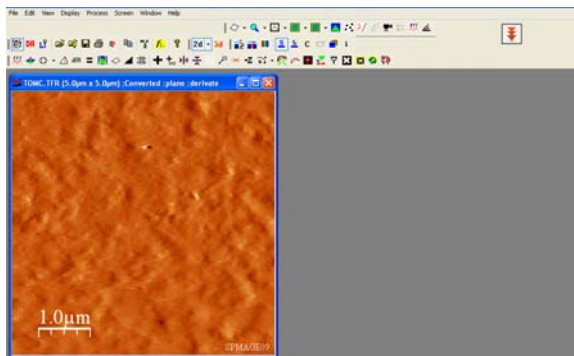
Bardzo ważną zaletą programu SPIP jest możliwość generowania obrazów 3D (rys. 9). Trójwymiarowa reprezentacja obrazu stanowi najwierniejszą reprezentację badanej powierzchni. Taka forma obrazowania oprócz zalet natury estetycznej czy artystycznej, posiada duży walor poznawczy i koncepcyjny. Bardzo często szczegóły obrazu nie widoczne w dwóch wymiarach, objawiają nam się właśnie w przestrzeni 3D, dzięki właściwemu operowaniu wielkościami: azymutem, wysokością, czy też perspektywą. W mikroskopie sił atomowych obraz powstaje przez rejestrację zmian sił oddziałujących na miniaturowe ostrze, przemieszczające się w sąsiedztwie badanej powierzchni [2, 3, 5].



Rys. 9. a) wygrzana powierzchnia wicynala krzemu Si (15 1 0) pokryta 4ML Au, b) wyspy Au o wysokości 2ML na powierzchni Si (1 1 1) [3]

### 3. PRACA W PROGRAMIE WSxM

Ciekawą alternatywą dla SPIP jest darmowy program WSxM hiszpańskiej firmy NANOTEC. Program ten może zostać wykorzystany do obróbki zdjęć uzyskanych na mikroskopie sił atomowych oraz do przeprowadzenia szczegółowej analizy chropowatości powierzchni. Okno programu zostało przedstawione na rys. 10.



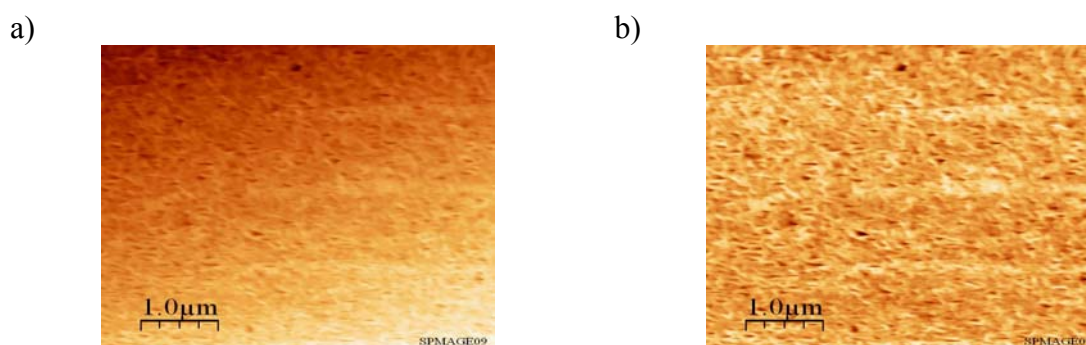
Rys. 10. Okno programu WSxM [6]



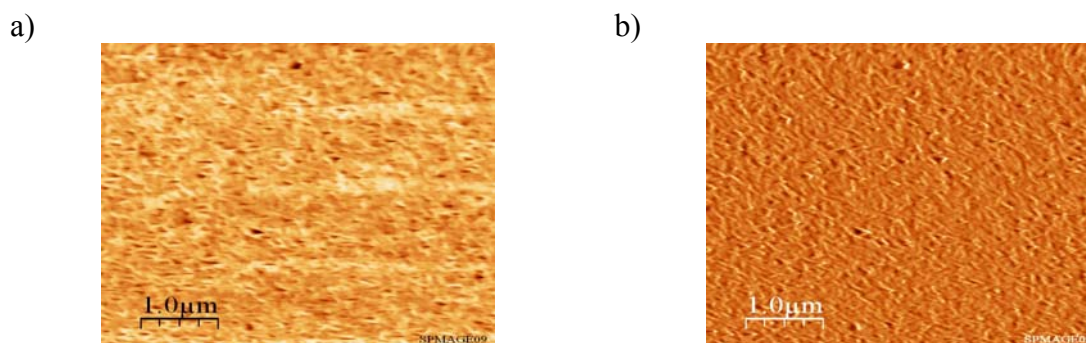
Podczas wykonywania pomiarów na mikroskopie sił atomowych, igła mikroskopu nigdy nie jest idealnie prostopadła do badanej próbki. Dlatego też do obróbki zdjęć używa się często filtru, który pozwala na wypoziomowanie otrzymanych obrazów (opcja „Plane correction” w programie WSxM). Przykład zastosowania takiego filtru przedstawiono na rysunku 11 [6].

Podczas obróbki zdjęć stosuje się również filtr „Derivative”, który wyostrza obraz i sprawia, że pewne granice między powtarzającymi się elementami są lepiej widoczne. Przykład zastosowania filtru przedstawiono na rysunku 12 [6].

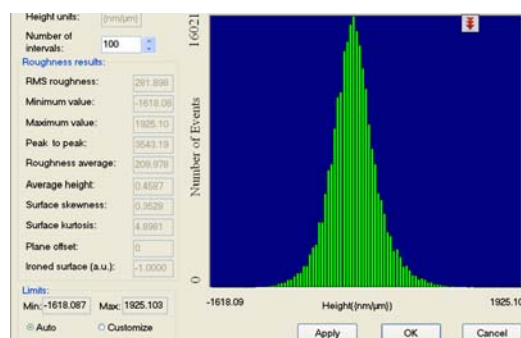
Program pozwala również na obliczenie podstawowych parametrów chropowatości takich jak RMS, Ra a także wartości maksymalnego wzniesienia oraz przedstawienie histogramu. Przykład wykonania takiej analizy chropowatości przedstawiono na rysunku 13 [6].



Rys. 11. Zdjęcie z mikroskopu AFM: a) przed zastosowaniem filtru "Plane correction", b) po zastosowaniu filtru "Plane correction" [6]



Rys. 12. Zdjęcie z mikroskopu AFM: a) przed zastosowaniem filtru "Derivative", b) po zastosowaniu filtru "Derivative" [6]



Rys. 13. Analiza chropowatości przeprowadzona w programie WSxM [6]

#### **4. PODSUMOWANIE**

Oprogramowania komputerowe takie jak np. WSxM hiszpańskiej firmy NANOTEC ułatwiają analizę zdjęć mikroskopowych. Pozwalają na wyeliminowanie błędów obrazowania i wydobycie z obrazu pożądaných informacji. Przetwarzanie obrazu nie pozwala na generowanie informacji, a jedynie je przekształca. Można więc mówić o nieograniczonych możliwościach przetwarzania obrazu, ale należy zawsze pamiętać o celu jakiego ma ono służyć.

#### **LITERATURA**

1. L. Wojnar, K. Kurzydłowski, J. Szala, Praktyka analizy obrazu, PTS, Kraków, 2002.
2. [www.imagement.com](http://www.imagement.com)
3. [www.ostm.umcs.lublin.pl](http://www.ostm.umcs.lublin.pl)
4. R. Tadeusiewicz, Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów, Kraków, 1997.
5. M. Żenkiewicz, J. Polański, Podstawy mikroskopii sił atomowych w badaniach polimerów, *Polimery* 44/7-8 (1999) 520-532.
6. Opracowanie własne.