



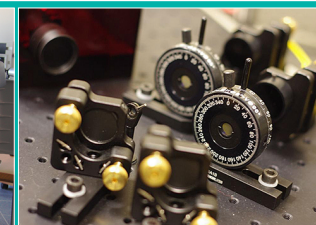
DLF

**DYDAKTYCZNE
LABORATORIUM
FIZYCZNE**

Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki
UNIwersytet Gdański

Ćwiczenie 30

Normalny i anomalny efekt Zeemana



I. Zagadnienia do opracowania.

1. Energia stanów stacjonarnych elektronów w atomach.
2. Liczby kwantowe stanów stacjonarnych orbit elektronowych.
3. Moment magnetyczny powłoki elektronowej atomu:
 - a) orbitalny moment magnetyczny;
 - b) spinowy moment magnetyczny.
4. Atom w stałym polu magnetycznym:
 - a) precesja Larmora;
 - b) częstość precesji Larmora;
 - c) czynnik Landego.
5. Wpływ pola magnetycznego na funkcje falowe i poziomy energetyczne atomu.
6. Normalny efekt Zeemana:
 - a) zeemanowskie rozszczepienie poziomów singletowych;
 - b) magneton Bohra;
 - c) reguły wyboru dla ΔM_L ;
 - d) wielkość rozszczepienia atomowych linii widmowych.
7. Teoria Lorentza:
 - a) składowe π i σ rozszczepienia zeemanowskiego linii singletowych;
 - b) polaryzacja składowych π i σ ;
 - c) normalny tryplet Lorentza.
8. Anomalny efekt Zeemana:
 - a) rozszczepienie poziomów energetycznych w przypadku anomalnego efektu Zeemana;
 - b) czynnik Landego.
9. Układ pomiarowy do badania poprzecznego i podłużnego zjawiska Zeemana.
10. Konstrukcja i zastosowanie interferometru Fabry'ego – Pérota.
11. Definicja światła spolaryzowanego.
12. Zmiana charakteru polaryzacji światła za pomocą ćwierćfalówki.
13. Parametry filtrów interferencyjnych.

II. Zadania doświadczalne.

1. Zapoznać się ze stanowiskiem pomiarowym widocznym na *Zdjęciu 1*.
2. Przygotować układ pomiarowy do badania zjawiska Zeemana. W tym celu wykonać następujące czynności : upewnić się, że pokrętko prądowe transformatora (5, *Zdjęcie 1*) jest ustawione w pozycji „0” a następnie włączyć transformator a także zasilacz lampy kadmowej (3, *Zdjęcie 1*) (przełącznikami na tyłach ich obudów) . Włączyć amperomierz (6 na *Zdjęciu 1*).



UWAGA!

Miernik cyfrowy posiada funkcję automatycznego wyłączenia się po pewnym czasie nieaktywności. Należy zwrócić uwagę, aby w czasie pomiarów amperomierz był stale włączony i włączyć go ponownie w razie potrzeby.



Zdjęcie 1. Stanowisko pomiarowe do badania efektu Zeemana: 1 – ława optyczna z elementami (od lewej do prawej): kamera CCD (w uchwycie), soczewka +50 mm, analizator, oprawa ćwierćfalówki, oprawa filtra zielonego, soczewka +300 mm, interferometr Fabry’ego – Pérota (z uchwycem na filtr czerwony), soczewka +50 mm; 2 – stolik obrotowy z elektromagnesem i lampą kadmową; 3 – zasilacz lampy; 4 – kondensator; 5 – transformator; 6 – multimetr cyfrowy (amperomierz); 7 – akcesoria (od lewej do prawej): filtr zielony w oprawie, filtr czerwony, ćwierćfalówka w oprawie; 8 – zestaw komputerowy.

Włączyć komputer i uruchomić podgląd z kamery CCD (skorzystać z opisu w *Dodatku A*).

- Zarejestrować rozszczepienie czerwonej linii kadmu ($\lambda = 643,847 \text{ nm}$) w normalnym efekcie Zeemana.

W tym celu upewnić się, że kierunek pola magnetycznego jest prostopadły do osi optycznej układu (obróć stolika z elektromagnesem umożliwia poluzowanie śruby blokującej pod stolikiem).

Filtr czerwony (7, *Zdjęcie 1*) umieścić w szczelinie interferometru a kierunek polaryzacji analizatora (1, *Zdjęcie 1*) ustawić jako pionowy.

- Zwiększać stopniowo wielkość natężenia prądu płynącego przez cewki elektromagnesu (pokrętkiem na przednim panelu transformatora 5, *Zdjęcie 1*) aż do pojawienia się widocznego rozszczepienia prążków interferencyjnych.



UWAGA!

Natężenie prądu płynącego przez uzwojenie elektromagnesu nie powinno przekraczać wartości **9 A**. Aby nie dopuścić do przegrzania uzwojenia, pokrętko prądowe transformatora należy skręcać do minimum po wykonaniu zadania.

- Dokonywać zapisu obrazów z kamery CCD (skorzystać z *Dodatku A*) zwiększając wartości natężenia prądu co 1 A.
- Zmienić kierunek polaryzacji analizatora na poziomy i dokonać obserwacji obrazu zmieniając wielkość natężenia pola magnetycznego.
- Korzystając z wykresu charakterystyki elektromagnesu w *Dodatku C* odczytać wartości indukcji pola magnetycznego B dla każdej z przyjętych wartości natężenia prądu I .
- Przeprowadzić analizę wyników pomiarowych normalnego efektu Zeemana:

- a) korzystając z *Dodatku B* lub z opisu programu do obsługi kamery CCD (pozycja 11. w IV.) dokonać pomiaru promieni pierścieni interferencyjnych na zarejestrowanych obrazach;
 - b) wykonać wykres zależności stosunku średnich różnic kwadratów promieni prążków interferencyjnych δ/Δ od wartości pola magnetycznego B ;
 - c) obliczyć wartości magnetonu Bohra μ_B oraz ładunku właściwego elektronu $\bar{q} = e/m_e$ (wraz z ich błędami);
 - d) porównać otrzymane wartości magnetonu Bohra i ładunku właściwego elektronu z danymi tablicowymi.
9. Wyjaśnić zachowanie się obrazów interferencyjnych zaobserwowanych w punkcie II.6.
10. Zarejestrować rozszczepienie linii widmowej kadmu ($\lambda = 508,588$ nm) w anomalnym efekcie Zeemana.
Upewnić się, że kierunek pola magnetycznego jest prostopadły do osi optycznej układu.
Usunąć filtr czerwony z interferometru Fabry'ego – Pérota.
Filtr zielony (7, *Zdjęcie 1*) umieścić w jego uchwycie (1, *Zdjęcie 1*) (ewentualne refleksy świetlne na podglądzie z kamery CCD można wyeliminować poprzez delikatne obracanie filtru w płaszczyźnie poziomej).
Aby wykonać pomiary dla składowych σ emitowanego światła, ustawić kierunek polaryzacji analizatora (1, *Zdjęcie 1*) jako pionowy.
11. Zwiększać natężenie prądu zasilającego cewki elektromagnesu aż do pojawienia się widocznego obrazu rozszczepienia prążków interferencyjnych.
12. Dokonywać zapisu obrazów z kamery CCD w zależności od wielkości natężenia prądu elektromagnesu. Każdorazowo zwiększać natężenie prądu o około 0,5 A.
13. Zmienić kierunek polaryzacji analizatora na poziomy i powtórzyć pomiary dla składowej π .
14. Z charakterystyki elektromagnesu w *Dodatku C* odczytać wartości indukcji pola magnetycznego B dla każdej wartości natężenia prądu I z punktu II.12.
15. Przeprowadzić analizę wyników pomiarowych anomalnego efektu Zeemana:
- a) dokonać pomiaru promieni pierścieni interferencyjnych na zarejestrowanych obrazach interferencyjnych dla anomalnego efektu Zeemana;
 - b) wykonać wykres zależności stosunku średnich różnic kwadratów promieni prążków interferencyjnych δ/Δ od wartości pola magnetycznego B osobno dla składowych π i σ linii widmowych światła lampy;
 - c) obliczyć wartości magnetonu Bohra μ_B i ładunku właściwego elektronu $\bar{q} = e/m_e$ osobno dla obu składowych emitowanego światła;
 - d) obliczyć uśrednione wartości magnetonu Bohra oraz ładunku właściwego elektronu i porównać je z danymi tablicowymi.
16. Zarejestrować obrazy interferencyjne normalnego i anomalnego podłużnego efektu Zeemana.
W tym celu zmienić geometrię układu obracając stolik z elektromagnesem tak, aby kierunek pola magnetycznego był równoległy do kierunku światła lampy.
17. Dobrać filtry do rodzaju wybranego do pomiarów efektu Zeemana.
18. Umieścić ćwierćfalówkę w uchwycie (1, *Zdjęcie 1*).
19. Dobrać wartość natężenia prądu zasilającego cewki elektromagnesu zapewniającą ostry obraz interferencyjny na ekranie monitora.
20. Zarejestrować obrazy interferencyjne dla obu rodzajów efektu Zeemana dla dwóch orientacji analizatora tj. $+45^\circ$ oraz -45° względem pionu.
21. Opisać wnioski z analizy uzyskanych wyników.

III. Zestaw przyrządów.

1. Kamera CCD.
2. 2 soczewki +50 mm.
3. 1 soczewka +300 mm.
4. Analizator.
5. Interferometr Fabry'ego – Pérota (rozmiar etalonu $3 \cdot 10^{-3}$ m).
6. Filtr zielony ($\lambda = 508$ nm) w oprawie.
7. Filtr czerwony ($\lambda = 595$ nm) w oprawie.
8. Ćwierćfalówka.
9. Lampa kadmowa.
10. Elektromagnes.
11. Zasilacz lampy kadmowej.
12. Autotransformator.
13. Obrotowy stolik.
14. Kondensator o pojemności 22 mF.
15. Miernik uniwersalny.
16. Zestaw komputerowy z oprogramowaniem *Motic Image Plus 2.0 ML*.

IV. Literatura.

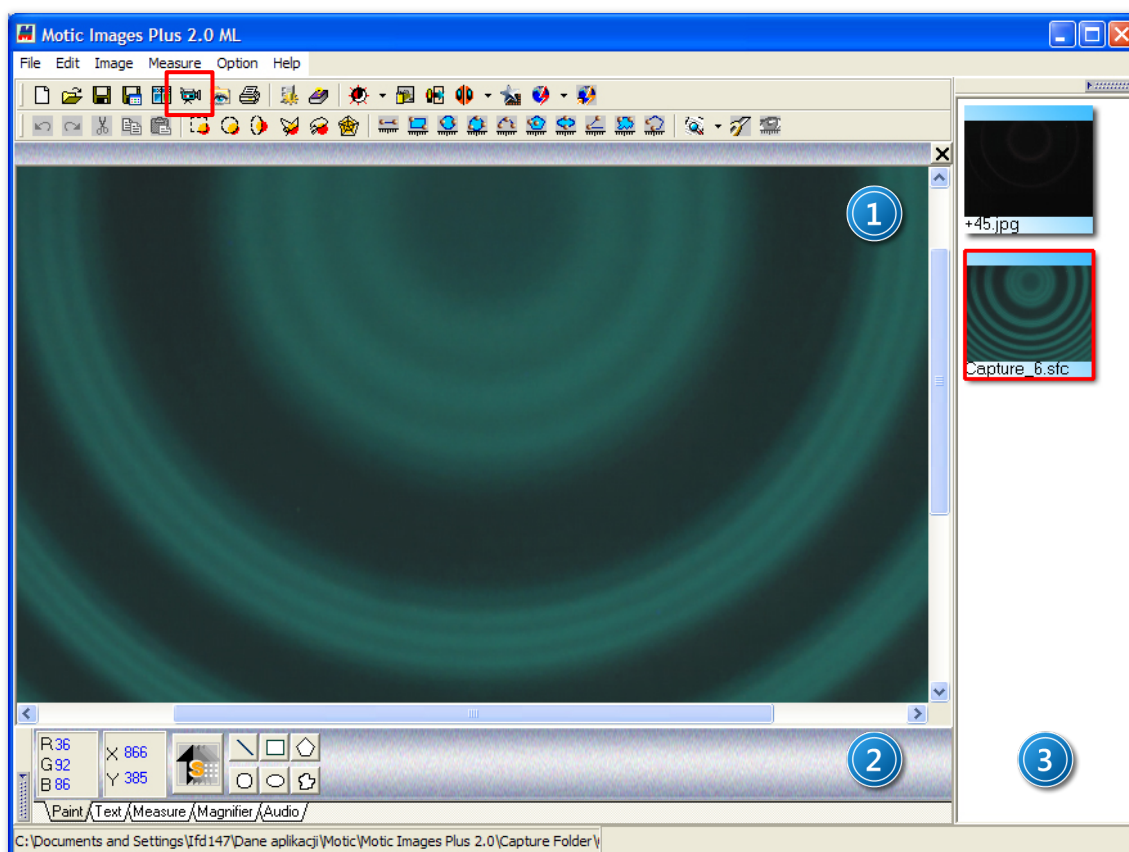
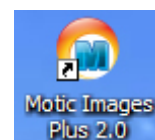
1. R. Eisberg, R. Resnick – „Fizyka kwantowa atomów, cząsteczek, ciał stałych, jąder i cząstek elementarnych”, PWN, Warszawa 1983.
2. H.A. Enge, M.R. Wehr, J.A. Richards – „Wstęp do fizyki atomowej”, PWN, Warszawa 1983.
3. Z. Leś – „Wstęp do spektroskopii atomowej”, PWN, Warszawa 1969.
4. R.I. Sołouchin – „Optyka i fizyka atomowa”, PWN, Warszawa 1982.
5. H. Haken, H.Ch. Wolf – „Atomy i kwanty. Wprowadzenie do współczesnej spektroskopii atomowej”, PWN, Warszawa 1997.
6. D. Kunisz – „Fizyczne podstawy emisyjnej analizy widmowej”, PWN, Warszawa 1973.
7. W.A. Shurcliff, S.S. Ballard – „Światło spolaryzowane”, PWN, Poznań 1968.
8. A. Kopystyńska – „Wykłady z fizyki atomu”, PWN, Warszawa 1989.
9. R.P. Feynman, R. Leighton, M. Sands – „Feynmana wykłady z fizyki”, T. II, cz.2; T.III., PWN, 2004.
10. V. Acosta, C.L. Cowan, B.J. Graham – „Podstawy fizyki współczesnej”, PWN, Warszawa 1981.
11. PHYWE “Laboratory Experiment Physics”, 5.1.10-05 Zeeman Effect, www.phywe.com.
12. E.U. Condon & G.H. Shortley – “The Theory of Atomic Spectra”, Athenaeum Press Limited, Newcastle upon Tyne 1991.
13. H.A. Enge, M.R. Wehr, J.A. Richards – “Introduction to Atomic Physics”, Addison-Wesley, Reading-Mass, 1981.
14. W.A. Shurcliff, S.S. Ballard – “Polarized Light”, Princeton, N.Y. 1964.
15. V. Acosta, C.L. Cowan, B.J. Graham – “Essentials of Modern Physics”, Harper & Row, N.Y. 1973.
16. H. Haken, H.Ch. Wolf – “The Physics of Atoms and Quanta”, Springer, 2000.
17. R.P. Feynman, R. Leighton, M. Sands – “The Feynman Lectures on Physics”, Vol. II, Part 2 & Vol.III., Addison - Wesley, 2005.

Dodatek A


Rejestrowanie obrazów z kamery CCD z użyciem programu *Motic Images Plus 2.0 ML*

A. Włączanie i dostosowywanie podglądu z kamery CCD.

1. Uruchomić program *Motic Images Plus 2.0 ML*, klikając dwukrotnie skrót do niego, umieszczony na pulpicie (oraz w *menu start*).
2. Otworzy się główne okno programu:



Zdjęcie 2. Okno programu *Motic Images Plus 2.0 ML*: 1 – podgląd aktualnie edytowanego obrazu, 2 – przybornik narzędziowy, 3 – lista miniatur przechwyconych obrazów. Czerwoną ramką oznaczono ikonę modułu *Motic Live Imaging Module*.

3. Kliknąć ikonkę kamery  umieszczoną na górnym pasku narzędzi (patrz Zdjęcie 2).
Otworzy się okno modułu *Motic Live Imaging Module* z podglądem z kamery CCD (Zdjęcie 3).



Zdjęcie 3. Okno modułu Motic Live Imaging Module: 1 – panel zakładek; 2 – panel konfiguracji funkcji; 3 – panel podglądu z kamery CCD.


4. Używając ikon zlokalizowanych w panelu zakładek (1, Zdjęcie 3) można wyświetlać różne opcje konfiguracyjne podglądu z kamery CCD i zmieniać je w razie potrzeby w panelu konfiguracji (2, Zdjęcie 3), m. in. jasność, nasycenie kolorów, kontrast, ostrość itd.



Wskazówka

Dostosowanie opcji wyświetlania podglądu z kamery CCD może bardzo polepszyć czytelność pozyskiwanych obrazów. Szczególnie pożyteczna jest opcja cyfrowej redukcji szumu (*Remove Noise*).

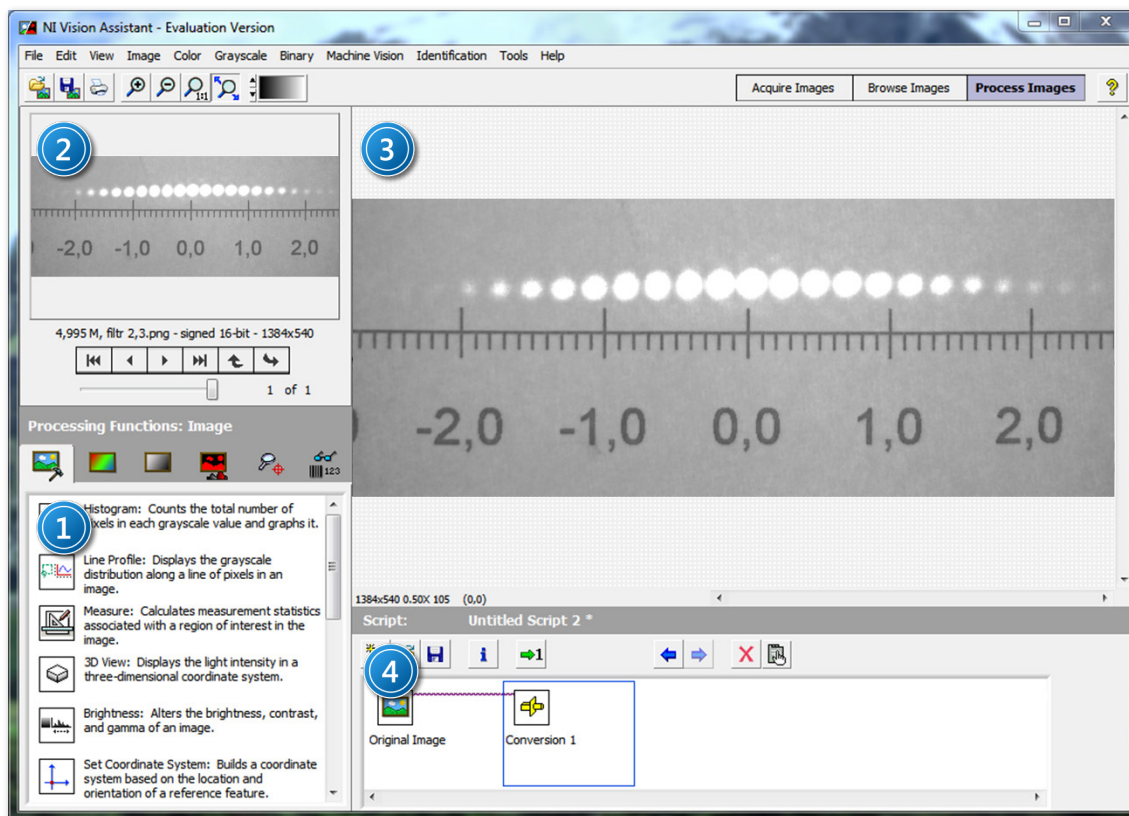
B. Rejestrowanie obrazów z kamery CCD.

1. W oknie modułu *Motic Live Imaging Module* przejść do zakładki przechwytywania obrazu, klikając ikonkę aparatu fotograficznego  w panelu zakładek (1, Zdjęcie 3).
2. Z listy rozwijalnej *Format* wybrać rozdzielczość obrazu wyjściowego. Wskazane jest zapisywanie obrazów w możliwie jak największej rozdzielczości celem łatwiejszej obróbki.
3. Kliknąć przycisk *Capture* celem przechwycenia obrazu z kamery CCD.
4. Miniatura przechwyconego obrazu wyświetla się w panelu miniatur w oknie programu *Motic Images Plus 2.0 ML* (3, Zdjęcie 2). Klikając na wybraną miniaturę można wyświetlić pełny podgląd przechwyconego obrazu (1, Zdjęcie 2).

5. Przechwycone obrazy zapisywane są w folderze *Capture Folder*, do którego skrót umieszczony jest na pulpicie i w *menu start*. Domyślnie program zapisuje obrazy w specyficznym dla siebie formacie *SFC*. Aby możliwa była późniejsza obróbka obrazów w dowolnym programie graficznym, konieczne jest zapisanie ich w formacie *JPEG* bądź *TIFF*. W tym celu należy:
- w oknie programu *Motic Images Plus 2.0 ML* kliknąć miniaturę wybranego obrazu;
 - po jego wyświetleniu się w panelu podglądu (1, *Zdjęcie 2*), z menu *File* wybrać *Save As...*;
 - w kolejnym oknie podać nazwę wybranego obrazu, wybrać format pliku, wskazać folder, w którym zapisany zostanie obraz i kliknąć przycisk *OK*.

Dodatek B

Opis pomiaru odległości pomiędzy elementami obrazu za pomocą programu *NI Vision Assistant 2009* (na przykładzie obrazu prążków interferencyjnych)





Zdjęcie 4. Okno programu *NI Vision Assistant*: 1 – panel wyboru funkcji; 2 – panel wyboru obrazu; 3 – panel podglądu obrazu; 4 – panel edycji skryptu.

A. Informacje ogólne.


Oprogramowanie *National Instruments Vision Assistant* oferuje możliwość dokonywania odczytów geometrycznych własności obiektów przedstawionych na obrazach rastrowych, takich jak odległości między punktami, pola powierzchni, średnice itp. Program obsługuje większość z dostępnych obecnie, popularnych formatów grafiki rastrowej (m. in. *.bmp, *.jpg, *.tif, *.png).





Lista czynności kolejno wykonywanych za pośrednictwem programu *NI Vision Assistant*, takich jak transformacje obrazu, pomiary odległości czy konwersje, zapisywana jest w postaci skryptu, wyświetlonego w panelu edycji skryptu (4, Zdjęcie 4).

Każdy z kroków skryptu może zostać usunięty z wykorzystaniem ikony , może być edytowany kliknięciem na ikonę  lub dwukrotnym kliknięciem na ikonę symbolizującą dany krok.

B. Otwieranie obrazów i przygotowywanie ich do edycji.

1. Otwieranie obrazu (obrazów) w programie *NI Vision Assistant* następuje na dwa sposoby:

- a) kliknąć przycisk  na pasku narzędzi w głównym oknie programu (lub wybrać polecenie *Open Image...* w menu *File*), następnie wybrać obraz (obrazy) i kliknąć przycisk *Otwórz*;

- b) przejść do przeglądarki obrazów, klikając kolejno polecenie *Browse Images* umieszczone w prawej części paska narzędzi głównego okna programu, przycisk  umieszczony na dole ekranu a następnie wybrać obraz (obrazy) i kliknąć przycisk *Otwórz*.
2. Po otwarciu żądanego obrazu (obrazów) można rozpocząć jego edycję i wykonywanie pomiarów. Wszystkie operacje są przeprowadzane na karcie przetwarzania obrazów, aktywowanej poprzez kliknięcie polecenia *Process Image*, umieszczonego w prawej części paska narzędzi głównego okna programu.
3. W każdej chwili można zmienić obraz aktualnie poddawany operacjom na karcie *Process Image*, klikając przyciski  w panelu wyboru obrazu (2, *Zdjęcie 4*) bądź przechodząc do przeglądarki (polecenie *Browse Images*) i dwukrotnie klikając miniaturę wybranego obrazu (lub zaznaczając wybraną miniaturę pojedynczym kliknięciem myszy i przechodząc na kartę *Process Image*).
4. Aby dodać nowe obrazy do przeglądarki, należy kliknąć przycisk  umieszczony na dole ekranu, następnie wybrać obraz (obrazy) i kliknąć przycisk *Otwórz*. W zależności od preferencji, udzielić odpowiedzi twierdzącej lub przeczącej na wyświetlone w oknie dialogowym pytanie o zastąpienie obrazów już istniejących w przeglądarce obrazami nowo wybranymi.
5. Kliknięcie przycisku  w przeglądarce obrazów pozwala przełączać się pomiędzy widokami siatki miniatur i podglądem pojedynczego obrazu na całym ekranie.

4

Wskazówka

Jeżeli po otwarciu, obraz (obrazy) jest wyświetlany jako zupełnie czarny, należy dokonać konwersji pliku, zmieniając jego głębokość bitową. W tym celu należy:

1. zaznaczyć właściwy obraz i przejść na kartę edycji (*Process Image*);
2. z menu *Greyscale* wybrać polecenie *Conversion*, po czym w panelu wyboru funkcji (1, *Rysunek 4*) wybrać z listy pozycję *8-bit [0, 255]* i potwierdzić wybór, klikając przycisk *OK*.

Przekształcony obraz można następnie zapisać, wybierając polecenie *Save Image* z menu *File*.

C. Dokonywanie pomiarów odległości między punktami.

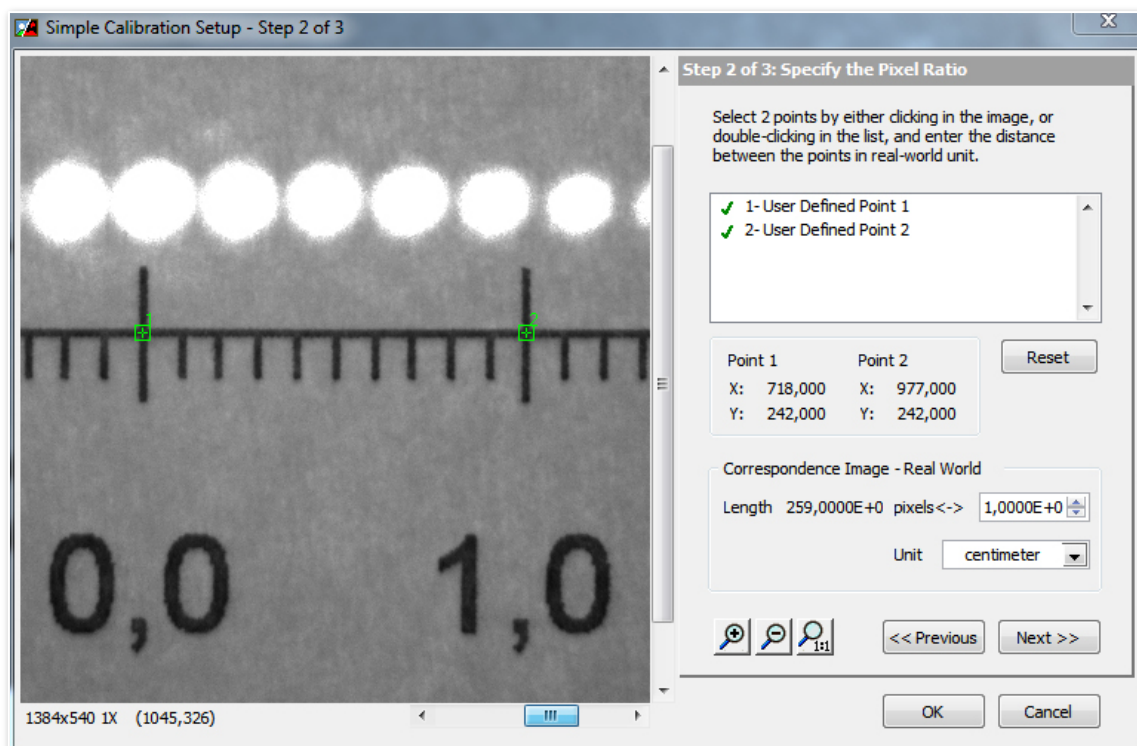
Program *NI Vision Assistant* pozwala na wykonywanie pomiarów odległości między punktami na obrazach, transformując odległość wyrażoną w pikselach na odległość wyrażoną w jednostkach rzeczywistych. Aby było to możliwe, należy dokonać kalibracji obrazu.

Kalibracja obrazu.

1. Z menu *Image* wybrać polecenie *Image Calibration*. Zostanie wyświetlone okno kreatora kalibracji.
2. Upewnić się, że zaznaczona jest pierwsza z opcji – *Simple Calibration*. Kliknąć przycisk *OK*.
3. W kroku 1 (*Step 1 of 3*) zostanie wyświetlony podgląd aktualnie otwartego obrazu. Upewniając się, że zaznaczono typ kwadratowy pikseli (*Square*), kliknąć przycisk *Next*.

4. W kroku 2 (*Step 2 of 3*) należy wskazać dwa punkty na obrazie, stanowiące końce odcinka o znanej rzeczywistej długości (np. dwa punkty na podziałce centymetrowej widocznego na obrazie ekranu), klikając w odpowiednich miejscach na podglądzie.

W pole liczbowe w sekcji *Correspondance Image – Real World* należy wpisać fizyczną odległość wzorcową między zaznaczonymi punktami i wybrać odpowiednią jednostkę (patrz *Zdjęcie 5*).

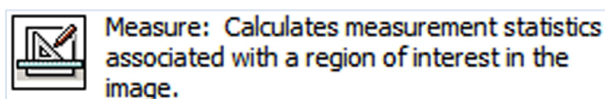


Zdjęcie 5. Okno kreatora kalibracji obrazu w programie NI Vision Assistant (na podgląd obrazu naniesiono punkty, stanowiące końce odcinka o znanej długości fizycznej (1 cm)).

5. Po ustaleniu odległości wzorcowej, kliknąć przycisk *Next* a następnie *OK*.
Okno kreatora zostanie zamknięte.
6. Potwierdzić dane kalibracji obrazu, klikając przycisk *OK* w panelu wyboru funkcji (1, *Zdjęcie 4*).

Wykonywanie pomiarów odległości na obrazach

1. Po dokonaniu kalibracji obrazu, można dokonywać pomiarów fizycznych odległości między punktami. W tym celu w panelu wyboru funkcji (1, *Zdjęcie 4*) należy kliknąć narzędzie *Measure*:



2. W liście możliwych typów pomiarów w panelu funkcji (teraz zatytułowanym *Measure Setup*) zaznaczyć pozycję *Length*.
3. Z pomocą myszy narysować na podglądzie obrazu odcinek między punktami, których odległość jest przedmiotem pomiaru.

Długość odcinka w jednostkach fizycznych zostanie wyświetlona w tabeli pomiarów w oknie edycji skryptu (*Length = ...*).

4. Można dokonywać serii pomiarów odległości, rysując nowe odcinki.
Každy z pomiarów zostanie zapisany w tabeli w osobnym wierszu.
5. Uzyskane dane można zapisać w postaci pliku tekstowego lub umieścić w arkuszu kalkulacyjnym programu *Microsoft Excel*. W tym celu należy kliknąć jeden z przycisków umieszczonych po prawej stronie panelu edycji skryptu (*Save Results* lub *Send Data To Excel*). Uzyskany plik tekstowy można następnie zaimportować do dowolnego programu używanego do obróbki i wizualizacji danych numerycznych (np. *Origin*, *Sigma Plot* i inne).
6. Aby zakończyć pracę z narzędziem *Measure*, należy kliknąć przycisk *OK* w panelu *Measure Setup*.

W każdej chwili można wrócić do rezultatów pomiarów (lub wykonać kolejne), klikając dwukrotnie ikonę kroku oznaczonego nazwą *Measure* w oknie edycji skryptu.

Dodatek C

Zależność indukcji pola magnetycznego B od natężenia prądu I w elektromagnesie na stanowisku do badania efektu Zeemana (dla odległości 9 mm pomiędzy nabiegownikami)

Źródło: Opis układu pomiarowego nr P251105, PHYWE Systeme GmbH & Co. [11]

