Uniwersytet Wrocławski Wydział Fizyki i Astronomii

Tomasz Greczyło

Doświadczenia studenckie wspomagane komputerem w II Pracowni Fizycznej – projekty i realizacja

Praca doktorska wykonana w Zakładzie Nauczania Fizyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego

Promotor: dr hab. Ewa Dębowska, prof. UWr.

Wrocław 2006

Mojej Rodzinie, Joli, Eli i Rysiowi poświęcam

WYRAZY WDZIĘCZNOŚCI

Szczególne wyrazy wdzięczności kieruję do mojego promotora, Profesor dr hab. Ewy Dębowskiej za pomoc w określeniu tematyki badawczej, opiekę naukową oraz cenne uwagi i pomoc podczas pracy w Zakładzie Nauczania Fizyki. Dziękuję ze poświęcony mi czas, który mimo wielu obowiązków zawsze potrafiła znaleźć. Jestem wdzięczny także za niezwykle miłą i partnerską atmosferę podczas całego okresu moich studiów doktoranckich. Doceniam i dziękuję za wiele cennych uwag i wskazówek, otrzymanych od Pani Profesor już podczas redagowania rozprawy. Były one wynikiem szeregu ciekawych rozmów.

Dziękuję także pracownikom i kolegom z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego, na których pomoc i wsparcie mogłem zawsze liczyć. Szczególnie dziękuję dr. Zygmuntowi Mazurowi za *rozmowy przez ścianę*.

Szczególnie chciałbym podziękować Rodzicom, przy których stawiałem pierwsze kroki oraz Pani Zofii Ławniczak – mojej pierwszej nauczycielce matematyki i wychowawczyni, której zawdzięczam zainteresowanie naukami przyrodniczymi.

Wyrazy wdzięczności składam szczególnym osobom, którym pozwoliłem sobie poświęcić tę rozprawę. Są nimi moja żona Jolanta, córka Elżbieta i syn Ryszard.

I. SPIS TREŚCI

WY	RAZY WDZIĘCZNOŚCI	4
I.	SPIS TREŚCI	5
CE	LE PRACY	9
II.	WSTĘP	.10
	Problematyka	.10
	Struktura pracy	.12
	Struktura materiałów dla prezentowanych doświadczeń	.13
III.	DOŚWIADCZENIE RUCHY BROWNA	.15
1.	WSTĘP	.15
2.	ZAGADNIENIA TEORETYCZNE	.15
	2.1 Ruchy Browna	.15
	2.2 Równanie Einsteina-Smoluchowskiego	.16
	2.3 Stała Avogadra i metody jej wyznaczania	.17
	2.4 Pomiary wideo	.18
	2.5 Cyfrowe filmy wideo i ich obróbka	. 19
3.	POMIARY WSTĘPNE	.21
	3.1 Wyznaczanie stałej Avogadra	.21
	3.2 Idea doświadczenia wstępnego	.21
	3.3 Elementy zestawu pomiarowego	.21
	3.4 Procedura pomiarowa	.22
	3.5 Opis zestawu eksperymentalnego	.23
	3.6 Wyniki pomiarów wstępnych	.24
	3.7 Wnioski	.25
4.	WYZNACZANIE LEPKOŚCI WODNYCH ROZTWORÓW GLICERYNY	.26
	4.1 Zestaw pomiarowy i procedura pomiarowa	.26
	4.2 Wyniki pomiarów	.27
	4.3 Wnioski	. 30
5.	PODSUMOWANIE	.30
6.	PODZIĘKOWANIA	.30
IV.	DOŚWIADCZENIE PROMIENIOWANIE RENTGENOWSKIE	.31
1.	WSTĘP	.31
2.	ZAGADNIENIA TEORETYCZNE	.31
	2.1 Promieniowanie Rentgenowskie	.31
	2.2 Stała Plancka i metody wyznaczania jej wartości	. 32
	2.3 Poziomy energetyczne w atomie	.33
	2.4 Struktura krystalograficzna	.33
	2.5 Dyfrakcyjne metody badania kryształów	.34
3.	APARAT RENTGENOWSKI	.35
	3.1 Charakterystyka aparatu	.35

3.2 Elementy aparatu rentgenowskiego	36
4. TWORZENIE STANOWISKA POMIAROWEGO	38
4.1 Wprowadzenie	38
4.2 Wyniki pomiarów	39
5. PODSUMOWANIE	43
6. PODZIĘKOWANIA	44
V. DOŚWIADCZENIE EMISJA POLOWA	45
1. WSTĘP	45
2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE	45
2.1 Elektronowa teoria budowy metali	45
2.2 Emisja polowa	46
2.3 Praca wyjścia i metody jej wyznaczania	47
2.4 Mikroskop polowy – budowa i zasada działania	47
2.5 Interpretacja obrazów emisyjnych	48
3. DOŚWIADCZENIE STUDENCKIE	48
3.1 Wprowadzenie	48
3.2 Idea doświadczenia studenckiego	49
4. ZESTAW POMIAROWY	49
4.1 Charakterystyka zestawu	49
4.2 Procedura pomiarowa	51
4.3 Elementy zestawu eksperymentalnego	52
4.4 Etapy procedury pomiarowej	53
5. WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI	55
6. PODSUMOWANIE	59
7. PODZIĘKOWANIA	60
VI. DOŚWIADCZENIE MAKROSKOPOWY MODEL MIKROSKOPU SIŁ ATOMOWYCH	61
1. WSTĘP	61
2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE	62
2.1 Drgania pręta zamocowanego jednostronnie	62
2.2 Mikroskop sił atomowych	66
3. TEMATYKA DOŚWIADCZENIA I APARATURA POMIAROWA	67
3.1 Zasada działania mikroskopu	67
3.2 Cele doświadczenia	67
4. ZESTAW POMIAROWY	68
4.1 Poszczególne elementy zestawu	68
4.2 Charakterystyka zestawu	69
4.3 Procedura pomiarowa	71
5. WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI	72
VII. WNIOSKI KOŃCOWE	77
VIII. PUBLIKACJE	79

IX. ZAŁĄCZNIKI	80
A. Ruchy Browna – Instrukcja do ćwiczenia	
A1. Ruchy Browna – Przechwytywanie filmów wideo	
A2. Ruchy Browna – Obróbka przechwyconego filmu wideo do formatu .avi dla pomia	rów wideo w
programie COACH 5	
B. Promieniowanie rentgenowskie – Instrukcja do ćwiczenia	91
B1. Promieniowanie rentgenowskie – Skrócony opis aparatu PHYWE X-RAY UNIT o	raz
oprogramowania MEASURE	96
C. Emisja polowa – Instrukcja do ćwiczenia	
D. Makroskopowy model mikroskopu sił atomowych – Instrukcja do ćwiczenia	110
X. LITERATURA	

CELE PRACY

Celem niniejszej pracy było:

- i. zaplanowanie i budowa nowych studenckich stanowisk pomiarowych w II Pracowni Fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego (II PF IFD UWr.),
- *ii.* przeprowadzenie pomiarów na poszczególnych stanowiskach i analiza otrzymanych wyników,
- *iii.* opracowanie propozycji obliczania niepewności pomiarowych w proponowanych doświadczeniach zgodnie z nowymi, międzynarodowymi normami [1],
- *iv.* przygotowanie materiałów opisujących stanowiska doświadczalne do bezpośredniego wykorzystania podczas zajęć ze studentami w II PF IFD UWr..

II. WSTĘP

Problematyka

Zajęcia w zaawansowanej pracowni przedmiotowej są ważnym elementem procesu kształcenia akademickiego na kierunkach przyrodniczych i politechnicznych. Dowodem ważności tego rodzaju zajęć jest rosnąca liczba publikacji, prezentujących różnorodne doświadczenia studenckie, w czasopismach fizycznych o zasięgu międzynarodowym – szczególnie w *European Journal of Physics* oraz *American Journal of Physics* [2, 3, 4]. Niestety literatura poświęcona ściśle zagadnieniom II Pracowni Fizycznej jest bardzo skąpa i ogranicza się jedynie do kilku pozycji [5, 6]. Nie zawiera ona także propozycji obliczania niepewności pomiarowych zgodnie z nowymi, międzynarodowymi normami.

Zajęcia laboratoryjne na zaawansowanym poziomie odgrywają szczególnie ważną rolę w kształceniu przyszłych fizyków. Podczas studiów licencjackich w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego (IFD UWr.) wszyscy studenci fizyki mają zajęcia w II Pracowni Fizycznej (II PF), w wymiarze 120 godzin podczas cyklu kształcenia. Na studiach magisterskich studenci specjalności fizyka doświadczalna, nauczycielska i medyczna przechodzą kolejny, 120 godzinny, kurs w II Pracowni Fizycznej [7]. Podobnie jest w innych uniwersytetach na terenie Polski i za granicą.

Ze względu na zróżnicowanie zaawansowanych pracowni fizycznych w poszczególnych ośrodkach akademickich, głównie ze względu na zróżnicowane obszary badawcze tych ośrodków, trudno jest stworzyć uniwersalną listę doświadczeń wykonywanych w tych pracowniach. Można jednak wskazać pewne doświadczenia podstawowe [8] kształtujące uniwersalne umiejętności.

Trudno wyobrazić sobie zdobywanie i doskonalenie umiejętności doświadczalnych inaczej, jak podczas pracy z aparaturą pomiarową, w trakcie wykonywania konkretnych zadań eksperymentalnych. Niezmiernie ważne jest zróżnicowanie tematyki badawczej oraz wykorzystanie wielu technik i przyrządów tak, by student miał możliwość poznania wielu technik pomiarowych stosowanych w fizyce. Jednocześnie ważnym jest by prezentowane techniki choć w części znajdowały zastosowanie w pracach badawczych ośrodka naukowego, w którym prowadzone są zajęcia dydaktyczne. Przygotowanie się studenta od strony teoretycznej do wykonywania doświadczenia w II PF oraz jego praktyczna realizacja mają służyć ugruntowaniu wiedzy i dostrzeżeniu możliwości jej praktycznego wykorzystania. Kolejnym bardzo ważnym elementem wykształcenia fizyka jest umiejętność obróbki wyników eksperymentalnych, ich krytyczna analiza oraz formułowanie i prezentowanie wynikających z nich wniosków, w tym obliczenie niepewności pomiarowych zgodnie z nowymi, międzynarodowymi normami [1, 9].

Zajęcia w zaawansowanej pracowni winny także umożliwiać wykorzystanie komputera oraz narzędzi programowych wspomagających procesy doświadczalne [8].

Nowoczesne doświadczenie studenckie powinno uwzględniać wszystkie wymienione aspekty, a jednocześnie pozostawiać nauczycielowi akademickiemu prowadzącemu zajęcia oraz studentowi swobodę w szczegółowym realizowaniu zadań doświadczalnych.

Niniejsza praca prezentuje nowe doświadczenia będące efektem prac autora nad wzbogaceniem i poszerzeniem bazy dydaktycznej II PF IFD UWr.. Składają się na nią trzy nowe doświadczania oraz jedno będące modyfikacją doświadczenia już istniejącego w II PF. Wszystkie te doświadczenia można zaliczyć do grupy doświadczeń podstawowych – kształtujących uniwersalne umiejętności doświadczalne, co sprawia, że mogą być wykonywane w różnych ośrodkach akademickich. Dobór ćwiczeń nie był przypadkowy i uwzględniał:

- tematykę badań prowadzonych w przeszłości lub obecnie w IFD;
- możliwość kształtowania umiejętności niezbędnych w pracy badawczej fizyka

 zastosowanie komputera do sterowania pomiarem i gromadzenia danych, wykorzystanie kamery wideo do rejestracji obrazów lub filmów wideo, krytyczną analizę i interpretację wyników doświadczalnych;
- aktualne potrzeby wynikające z funkcjonowania II PF;
- możliwości finansowe II PF.

Autor szczegółowo opisuje poszczególne zadania doświadczalne, dołącza ich instrukcje ćwiczeniowe, przedstawia także wyniki eksperymentalne pochodzące z ich realizacji oraz propozycje obliczania niepewności pomiarowych. Prezentowane doświadczenia są próbą szerszego wykorzystania aparatury pomiarowej, w szczególności komputerów, w pracowni studenckiej i winny być traktowane jako uzupełnienie i poszerzenie już istniejącej bazy stanowisk pomiarowych.

Struktura pracy

Rozprawę otwierają cele pracy doktorskiej oraz wstęp opisujący tematykę podjętego problemu, strukturę niniejszej pracy oraz strukturę materiałów dla studentów.

Pierwszy rozdział pracy zawiera opis doświadczania studenckiego zatytułowanego *Ruchy Browna*. Struktura rozdziału jest zbliżona do struktury materiałów do doświadczenia przygotowanych dla studenta i została poszerzona o elementy pozwalające na stworzenie spójnej całości. Zgodnie z założeniami, opis doświadczenia studenckiego i wyników będących efektem jego realizacji, poprzedza rozbudowana część teoretyczna.

Kolejny rozdział pracy to opis doświadczenia studenckiego zatytułowanego *Aparat rentgenowski*. Podobnie jak rozdział pierwszy ma on strukturę odpowiadająca strukturze materiałów dla studenta wzbogaconą o elementy czyniące z materiału spójną całość oraz poszerzoną część teoretyczną.

Na kolejny rozdział pracy składa się opis doświadczenia *Emisja polowa* wraz z wynikami eksperymentalnym oraz stosownymi komentarzami.

Ostatni rozdział opisujący zaawansowane doświadczenia studenckie poświęcony jest zagadnieniom związanym ze stanowiskiem studenckim o nazwie *Makroskopowy model mikroskopu sił atomowych*.

W celu całościowego objęcia prezentowanych zagadnień w niniejszej pracy do opisu każdego z doświadczeń dodano krótkie opracowanie tematyki badawczej będące nieco bardziej szczegółowym rozbudowaniem podpunktu *Zagadnienia teoretyczne* oraz bardzo szczegółowo opisano poszczególne doświadczenia.

W załączniku pracy znajdują się wszystkie materiały przygotowane dla studentów i prowadzących zajęcia w II PF IFD UWr..

Pracę zamykają wnioski końcowe, w których podsumowywane są efekty pracy stanowiącej rozprawę doktorską oraz proponowane są dalsze kierunki rozwoju prac nad doskonaleniem doświadczeń studenckich w II PF IFD UWr..

Rozprawę kończy spis publikacji autora, które złożyły się na niniejszą pracę oraz spis literatury cytowanej. Symbol * znajdujący się przy numerze porządkowym cytowanej pracy oznacza, że została ona dołączona do rozprawy w wersji elektronicznej i znajduje się na płycie CD. Na płycie znajduje się także plik całej rozprawy w formacie *pdf*. zatytułowany *rozprawa*.

Struktura materiałów dla prezentowanych doświadczeń

Materiały do każdego z doświadczeń są podzielone na następujące części:

- Zagadnienia teoretyczne
- Literatura
- Cel ćwiczenia
- Zestaw doświadczalny
- Część doświadczalna
- Niepewności pomiarowe
- Dodatki

Zagadnienia teoretyczne określają bardzo ogólnie problematykę ważną dla zrozumienia i prawidłowego wykonania zadania doświadczalnego. Dalszego sprecyzowania problemów dokonuje prowadzący zajęcia. Takie ujęcie tematyki ćwiczenia studenckiego umożliwia dostosowanie wymagań dydaktycznych do poziomu reprezentowanego przez studenta, a także na indywidualne, w porozumieniu z prowadzącym, ich modyfikowanie.

W podpunkcie *Literatura* umieszczono wybrane pozycje literaturowe pozwalające zapoznać się z problematyką ćwiczenia. Lista nie jest zamknięta i stanowi jedynie punkt wyjścia dla dalszych poszukiwań, które winien prowadzić student.

Cel ćwiczenia to jasne i zwięzłe przedstawienie spodziewanych efektów pracy.

W części Zestaw doświadczalny opisywana jest szczegółowo aparatura używana na stanowisku pomiarowym. Często w miejscu tym znajdują się odnośniki do innych pozycji literaturowych.

Część doświadczalna to skrócony opis procedury pomiarowej proponowanej przez autora. Prezentowana procedura może być modyfikowana zgodnie z zaleceniami prowadzącego zajęcia.

Niepewności pomiarowe zawierają propozycje opracowania wyników doświadczalnych będących efektem realizacji ćwiczenia studenckiego.

W części ostatniej – *Dodatki* – znaleźć można wszystkie dodatkowe informacje niezbędne do prawidłowego przeprowadzenia doświadczenia np. opisy oprogramowania, tabele użytecznych wielkości, stosowne wykresy, itp.. Forma prezentowanych opisów różni się od dotychczas spotykanych w literaturze [5, 6]. Podstawowa różnica to inny układ treści, brak rozbudowanej części teoretycznej oraz przykładowych wyników, przy szczegółowym opisie zestawu doświadczalnego. Takie ujęcie tematu służyć ma poprawie czytelności i przejrzystości doświadczenia oraz ułatwić studentowi jego wykonanie.

Autor dbał, by materiały dla prezentowanych doświadczeń nie miały charakteru szczegółowego opisu procedury pomiarowej i pozwalały prowadzącemu i studentowi na samodzielne zaplanowanie i realizację poszczególnych zadań eksperymentalnych.

III. DOŚWIADCZENIE RUCHY BROWNA

1. WSTĘP

Zagadnienia związane z ruchami Browna i zadania eksperymentalne pozwalające na ich badanie wydają się być doskonałym tematem umożliwiającym doskonalenie zarówno sposobu jak i narzędzi używanych podczas zajęć kształtujących umiejętności doświadczalne.

Niniejszy rozdział prezentuje doświadczenie o nazwie *Ruchy Browna* przygotowane w zaawansowanej pracowni fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego. Doświadczenie wykorzystuje nowe metody pomiarowe tzw. pomiary wideo [10] prowadzone na rzeczywistych filmach nagranych w technice cyfrowej.

Autor ma nadzieję, że studenci wykonując opisane zadania eksperymentalne i przygotowując doświadczenia od strony teoretycznej będą mieli możliwość ugruntowania zdobytej już wiedzy i umiejętności. Opisywane doświadczenie z pewnością pozwoli doskonalić umiejętność obróbki wyników eksperymentalnych, ich krytyczną analizę oraz formułowanie i prezentowanie wynikających z nich wniosków. Doświadczenie to umożliwi także wykorzystanie komputera oraz narzędzi programowych do przeprowadzenia pomiarów i opracowania ich wyników.

2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE

2.1 Ruchy Browna

Postać Roberta Browna jest zazwyczaj kojarzona z ruchem drobin (mikroskopijnych rozmiarów pyłków roślinnych) rozpuszczonych w wodzie, które to ruchy biolog dostrzegł w 1828 roku używając mikroskopu optycznego. Niezależne prace Mariana Smoluchowskiego i Alberta Einsteina, prowadzone na początku dwudziestego stulecia, rzuciły światło na przyczyny obserwowanego zachowania się drobin [11].

Zjawisko ruchów Browna – ruchu maleńkich drobin zawiesiny w cieczy obserwowanych pod mikroskopem – jest najczęściej używane do ilustrowania realności kinetyczno-molekularnego modelu budowy ciał [12]. Rzeczywiste ruchy Browna, na przykładzie zawiesiny tłuszczu lub dymu papierosowego w cieczy, często prezentowane są podczas wykładów kursowych z fizyki. Jeśli rozważamy jednowymiarowe błądzenie przypadkowe [13] to możemy przyjąć, że jeden krok to jednostkowe przesunięcie:

$$x_I = \pm 1.$$

Po dwóch krokach przesunięcie możemy zapisać jako

$$x_2 = x_1 \pm 1,$$

stąd:

$$x_2^2 = x_1^2 \pm 2x_1 + 1.$$

Wiedząc, że

```
< x_1 > = 0
```

otrzymujemy:

$$\langle x_2^2 \rangle = \langle x_1^2 \rangle + 1 = 2.$$

Kontynuując takie rozważania dla kolejnych N kroków możemy zapisać:

$$< x_{\rm N}^2 > = {\rm N}.$$

2.2 Równanie Einsteina-Smoluchowskiego

W oparciu o teorię kinetyczno-molekularną [14] dla przestrzeni jednowymiarowej można otrzymać wzór wiążący średni kwadrat przemieszczenia $\langle x^2 \rangle$ sferycznej cząstki, która jest bombardowana przez dużo mniejsze molekuły, wśród których się znajduje, z czasem obserwacji *t*.

Wychodząc z formuły Langevina i stosując prawo Stokesa dla sferycznych drobin w jednym wymiarze otrzymujemy następujące równanie ruchu [15]:

$$m\ddot{x} = -\alpha\dot{x} + F(t) \tag{2.2.1}$$

gdzie: m – masa drobiny, x – jej przemieszczenie, $\alpha = 6\pi\eta a (a$ – promień drobiny, η – współczynnik lepkości cieczy, w której jest zanurzona) i F(t) – przypadkowo zmieniająca się siła. Mnożąc (2.2.1) przez x otrzymujemy:

$$mx\ddot{x} = m\left[\frac{d}{dt}(x\dot{x}) - \dot{x}^2\right] = -\alpha x\dot{x} + xF(t).$$
(2.2.2)

Biorąc średnią po wielkiej liczbie cząstek dla (2.2.2) i pamiętając, że dla dostatecznie małych przedziałów czasu $\langle xF(t)\rangle = \langle x\rangle\langle F(t)\rangle = 0$, mamy:

$$m\left\langle \frac{d}{dt}(x\dot{x})\right\rangle = m\frac{d}{dt}\left\langle x\dot{x}\right\rangle = m\left\langle \dot{x}^{2}\right\rangle - \alpha\left\langle x\dot{x}\right\rangle, \qquad (2.2.3)$$

a wykorzystując związek $\frac{1}{2}m\langle \dot{x}^2 \rangle = \frac{1}{2}kT$, gdzie *T* – temperatura mieszaniny, *k* – stała

Boltzmanna, otrzymujemy:

$$\left(\frac{d}{dt} + \frac{\alpha}{m}\right) \langle x\dot{x} \rangle = \frac{kT}{m}.$$
(2.2.4)

Zapisując rozwiązanie (2.2.4) w formie

$$\langle x\dot{x}\rangle = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}\langle x^2\rangle = Ce^{-\frac{\alpha}{m}t} + \frac{kT}{\alpha},$$
 (2.2.5)

i zakładając, że dla t = 0, x = 0 otrzymujemy $C = -\frac{kT}{\alpha}$. Stąd z (2.2.5) dostajemy równanie:

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left\langle x^{2}\right\rangle = \frac{kT}{\alpha}\left(1-e^{-\frac{\alpha}{m}t}\right).$$
(2.2.6)

Całkując (2.2.6) dostajemy średni kwadrat przemieszczenia w jednym wymiarze

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kT}{\alpha} \left[t - \frac{1}{\alpha/m} \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{m}t} \right) \right].$$
 (2.2.7)

Dla warunku $t >> \frac{m}{\alpha}$, (2.2.7) można zapisać w postaci

$$\left\langle x^{2}\right\rangle = \frac{2kT}{\alpha}t = \frac{kT}{3\pi\eta a}t$$
 (2.2.8)

Ponieważ $k = \frac{R}{N_A}$, gdzie: R – stała gazowa, N_A – stała Avogadra, a dla przemieszcze-

nia *r* w trzech wymiarach $\langle r^2 \rangle = 3 \langle x^2 \rangle$ zatem

$$\left\langle r^{2}\right\rangle = \frac{RT}{\pi a \eta N_{A}}t$$
 (2.2.9)

Równanie to jest znane jako równanie Einsteina-Smoluchowskiego dla trzech wymiarów.

2.3 Stała Avogadra i metody jej wyznaczania

W roku 1908 Jean Perrin potwierdził doświadczalnie słuszność równania Einsteina-Smoluchowskiego (2.2.9) i w oparciu o wyniki doświadczalne [16] wyznaczył wartość stałej Avogadra, za co w roku 1926 otrzymał nagrodę Nobla z fizyki.

Przyjmuje się, że stała Avogadra, zwana także liczbą Avogadra, to liczba cząsteczek substancji znajdująca się w jednym molu tej substancji. Zazwyczaj oznaczana jest przez

 N_A i wynosi: $N_A = 6,022 \ 141 \ 99(47) \cdot 10^{23} \ \text{mol}^{-1}$. Stała Avogadra nie jest wielkością bezwymiarową i jest używana również do określania liczby innych niż cząsteczki indywiduów chemicznych, jak: jony, atomy, itp [17].

Wyznaczenia stałej Avogadra można dokonać również korzystając z pierwszego prawa elektrolizy Faradaya [18]. Podczas przepływu prądu przez roztwór przewodzący wydzielona masa jednego ze składników roztworu jest proporcjonalna do ładunku, jaki przepłynął przez elektrolit. Do wydzielenia jednego mola jednowartościowej substancji potrzebny jest ładunek elektryczny równy 96485 C, nazywany stałą Faradaya *F*. Ponieważ każdy jon takiej substancji niesie ładunek elementarny *e*, zatem liczbę Avogadro można wyznaczyć z zależności: $N_A = \frac{F}{a}$.

Inny sposób wyznaczania N_A bazuje na wykorzystaniu zależności pomiędzy stałą gazową R oraz stałą Boltzmanna k, danej wzorem: $k = \frac{R}{N_A}$. Wyznaczenie liczby Avogadra jest możliwe jeśli znana jest wartość stałej Boltzmanna (np. z badań zjawiska osiadania cząstek koloidalnych w roztworze [19]) oraz skorzysta się z prawa gazu doskonałego dla jednego mola substancji $p \cdot V = R \cdot T$, dla wyznaczenia stałej gazowej [20].

Do wyznaczania liczby Avogadra stosowane jest także zjawisko emisji cząstek α. Jeśli znana jest stała rozpadu preparatu promieniotwórczego, to możliwe jest wyznaczenie liczby atomów helu powstałych w określonym czasie w jednostkowej objętości, a co za tym idzie także liczby Avogadra [21].

2.4 Pomiary wideo

Pod nazwą *Pomiary wideo* kryje się procedura, podczas której informacje o ruchu obiektu (położeniu i czasie) uzyskiwane są z cyfrowego filmu wideo. Do przeprowadzenia tego rodzaju pomiarów niezbędne jest oprogramowanie pomiarowo-kontrolne np. COACH 5 [22], Vidshell, VideoPoint, VideoGraph, Word in Motion.

Podczas procedury pomiarowej dane przedstawiające ruch obiektu rejestrowane są poprzez zaznaczanie jego położenia na poszczególnych klatkach filmu. Uzyskane wyniki można prezentować na wykresach, w formie tabeli, poddawać analizie lub porównywać z modelem.

Rozpoczynając pracę z filmem należy:

• wybrać klatki, na których dokonywane będą pomiary;

- wyskalować pierwszą klatkę filmu tzn. przypisać określonej odległości na klatce filmu odpowiadającą jej rzeczywistą odległość;
- wybrać położenie układu współrzędnych wykorzystując jedną z dwóch możliwości: a) jednorazowe wybranie położenia kartezjańskiego układu współrzędnych dla wszystkich klatek; b) wskazanie tego położenia dla każdej z klatek oddzielnie;
- wybrać punkt (kilka punktów maksymalnie 8) należący do poruszającego się obiektu, który będzie wskazywany na wybranych klatkach, i którego położenie będzie rejestrowane;
- określić szybkość z jaką nagrany został film.

Pomiary sprowadzają się do wskazywania myszą punktu (punktów) na klatkach filmu. Program komputerowy zapamiętuje współrzędne każdego z punktów i odpowiadający im czas. Wielkości te mogą być w dowolny sposób przekształcane i prezentowane.

2.5 Cyfrowe filmy wideo i ich obróbka

Analogowe kamery wideo pracujące w standardach VHS/8mm i VCR są od lat stosowane do zapisu obrazów. Znane są też próby ich wykorzystywania w nauczaniu fizyki [23, 24]. Aby można było wykorzystać analogowy film do pomiarów wideo należy dokonać jego konwersji do formatu cyfrowego. Służą do tego różnego rodzaju karty do przechwytywania filmów wideo, do których podłącza się kamerę lub magnetowid i dokonuje zapisu filmu na dysku komputera.

W odróżnieniu od filmów analogowych filmy w technice cyfrowej są zapisywane bezpośrednio na kasetę lub w pamięci urządzenia nagrywającego, a następnie kopiowane do komputera w formie umożliwiającej ich odtwarzanie lub przetwarzanie. Ponieważ podczas tego procesu nie wykorzystuje się karty przechwytującej, jakość obrazu jest wyższa od obrazów rejestrowanych z użyciem kamery analogowej. Do nagrywania filmów cyfrowych można wykorzystać kamerę cyfrową, cyfrowy aparat fotograficzny lub kamerę internetową.

Cyfrowy film wideo jest zazwyczaj skompresowany, to znaczy zapisany w określonym formacie i z użyciem konkretnego kodeka. Program COACH 5, którym posłużyłem się w opisywanych pomiarach współpracuje jedynie z kilkoma formatami zapisu plików [25], do których należą:

 AVI (Audio Video Interleave) – format opracowany i stosowany przez Microsoft Corporation,

- QuickTime MOV format opracowany przez Apple Computer,
- MPEG (Moving Picture Experts Group), będący standardem ISO.

Ponadto podczas pracy z COACH 5 zaleca się wykorzystywanie następujących kodeków:

- RADIUS Cinepak popularny kodek stworzony przez SuperMac Inc.,
- INDEO kodek stworzony przez Intel Corporation.

Zapisany na dysku film wideo w formacie cyfrowym może zostać modyfikowany (edytowany) dzięki programom do edycji wideo. Edycja może polegać na zmianie długości, formatu lub zawartości poszczególnych klatek obrazu. Przykładami programów komercyjnych służących do obróbki obrazów wideo są Adobe Premiere lub Pinnacle Studio [26]. Dobrą alternatywą programów komercyjnych jest darmowy program VirtualDub [27].

3. POMIARY WSTĘPNE

3.1 Wyznaczanie stałej Avogadra

Autor uważa, że zastosowanie techniki pomiarów wideo umożliwia przygotowanie doświadczenia pozwalającego na ilościowe badanie zjawiska ruchów Browna, a powtórzenie pomiarów przeprowadzonych przez Jeana Perrina, stanowi doskonały temat doświadczenia studenckiego. Autor postanowił ocenić możliwości przygotowania doświadczenia studenckiego przeprowadzając pomiary wstępne mające na celu wyznaczenie stałej Avogadra w oparciu o obserwacje i pomiar położenia kulek lateksowych o określonej średnicy w roztworze wodnym o znanej lepkości. Wyniki tych pomiarów stały się bodźcem do przygotowania doświadczenia studenckiego *Ruchy Browna* mającego na celu wyznaczanie lepkości roztworów.

Pomiary wstępne potwierdziły użyteczność zestawu pomiarowego oraz metody pomiarów wideo w zaawansowanej pracowni fizycznej [28] a ich wyniki zostały przedstawione poniżej.

3.2 Idea doświadczenia wstępnego

Wyznaczenie stałej Avogadra z wykorzystaniem prezentowanego poniżej zestawu pomiarowego jest możliwe przy założeniu, że znany jest współczynnik lepkości cieczy η , jej temperatura *T*, oraz promień *a* drobin w kształcie sfer umieszczonych w cieczy. Dla przypadku dwóch wymiarów, z którym mamy do czynienia w opisywanym doświadczeniu, równanie (2.2.9) przyjmuje postać:

$$\left\langle r^{2}\right\rangle = \frac{2RT}{3\pi a\eta N_{A}}t.$$
 (3.2.1)

Doświadczenie przeprowadzono w temperaturze pokojowej, stąd $T=(293\pm1)$ K, natomiast współczynnik lepkości użytej cieczy wynosił $\eta=(1,00\pm0,05)$ Pa·s, a średni promień drobin $a=(425\pm25)$ nm.

3.3 Elementy zestawu pomiarowego

Do przygotowania zestawu pomiarowego wykorzystałem aparaturę znajdującą się w posiadaniu II Pracowni Fizycznej oraz Zakładu Nauczania Fizyki w IFD UWr. Składają się na nią elementy widoczne na rysunku 3.3.1:

 mikroskop optyczny BAD Carlzeiss Jena nr 469634 ze stołem pomiarowym umożliwiający rejestrowanie powiększonego obrazu – fabrycznie mikroskop umożliwiał wykonywanie zdjęć fotograficznych, ale został przystosowany do montażu kamery wideo;

- analogowa, przemysłowa kamera wideo Unitra Polkolor TP-K16, rejestrująca obraz czarno-biały;
- monochromatyczny monitor Unitra WZT TWM-315, służący do precyzyjnej oceny ostrości obrazu rejestrowanego przez kamerę – zastosowano monitor, gdyż okno w programie służącym do przechwytywania filmów wideo jest zbyt małe by dostatecznie precyzyjnie ustawić ostrość obrazu;
- zestaw komputerowy z systemem operacyjnym Windows 95 oraz oprogramowaniem edukacyjnym COACH 5, w skład którego wchodzi oprogramowanie do pomiarów wi-

deo;

 karta wideo miroVIDEO DC 10 (wewnątrz komputera) wraz z oprogramowaniem do przechwytywania i zapisywania filmów w formacie cyfrowym.



Rys. 3.3.1 Widok poszczególnych elementów zestawu użytego do wyznaczenia stałej Avogadra

3.4 Procedura pomiarowa

W procedurze pomiarowej można wyróżnić następujące etapy:

- przygotowanie roztworu wodnego kulek lateksowych i umieszczenie go pod mikroskopem;
- 2. rejestracja filmu wideo przedstawiającego ruch chaotyczny kulek lateksowych;
- pomiary na filmie cyfrowym z zastosowaniem oprogramowania do pomiarów wideo COACH 5;
- 4. opracowanie wyników pomiarów w arkuszu kalkulacyjnym Excel[®].

3.5 Opis zestawu eksperymentalnego

Mikroskop optyczny wraz z kamerą i monitorem umożliwiają otrzymywanie powiększenia około 2000 razu. W mikroskopie używany jest obiektyw o powiększeniu 100 razy, pracujący w obecności olejka immersyjnego o współczynniku załamania dla światła białego n=1,515 (20 °C). Dla przeprowadzenia pomiaru badany roztwór wprowadzono do pętli metalowej znajdującej się na szkiełku mikroskopowym (rys. 3.5.1) i przykryto szkiełkiem nakrywkowym uzyskując w ten sposób dwuwymiarową przestrzeń eksperymentalną – taka geometria układu uniemożliwiała bowiem przemieszczanie się drobin w głąb roztworu. Na górne szkiełko naniesiono olejek immer-



Rys. 3.5.1 Widok szkiełka mikroskopowego z pętlą wykonaną z drutu o znanej średnicy



Rys. 3.5.2 Klatka filmu z widocznym układem odniesienia, średnicą drutu służącą do skalowania odległości i punktem pomiarowym (P1)

syjny. Rysunek 3.5.1 przedstawia płytkę szklaną wraz z pętlą metalową wykonaną z drutu o średnicy $d=(40\pm5) \mu m$, wewnątrz której umieszczano wodny roztwór kuleczek lateksowych. Wykorzystano mieszaninę drobin lateksowych produkowanych przez *Beckman Coulter_{TM}*, których koncentracja została dobrana tak, by w obszarze badanym znajdowało się kilkanaście kuleczek – patrz rysunek 3.5.2.

Następnie, z użyciem kamery, komputera z kartą wideo oraz programu miroMEDIA Manager zarejestrowano 30. sekundowy film przedstawiający ruch drobin. Ponieważ używana kamera jest kamerą analogową starszej generacji niezbędnym było zastosowanie cyfrowej karty do przechwytywania obrazów – tworzenia cyfrowych filmów wideo na komputerze. Karta umożliwia nagrywanie filmów z szybkością 1-30 klatek na sekundę a konkretną wartość szybkości określa się w programie służącym do sterowania kartą.

Pierwsza klatka filmu została przedstawiona na rysunku 3.5.2. Informacje o ruchu poszczególnych drobin (położeniu i czasie) uzyskałem z cyfrowego filmu wideo dzięki

procedurze pomiarów wideo realizowanej w programie COACH 5. Dane tj. wartości – czasu (*t*), położenia X (*PX*) i położenia Y (*PY*), rejestrowane były poprzez wskazywanie myszą położenia badanej drobiny na poszczególnych klatkach filmu. Dla prawidłowego przeprowadzenia pomiarów niezbędne było wyskalowanie odległości na filmie tzn. przypisanie określonej odległości na badanym filmie cyfrowym odpowiadającej jej rzeczywistej odległości. Rzeczywista odległość jest przedstawiona na ekranie w formie znacznika i jest nią średnica drutu, z którego wykonano pętlę. W procesie skalowania określono także położenie układu odniesienia, w którym prowadzone były pomiary. Środek układu odniesienia umieszczano zawsze w miejscu, w którym znajdowała się badana cząstka na pierwszej klatce filmu. Położenie układu odniesienia na kolejnych klatkach filmu nie zmieniało się. Pomiaru dokonano na co trzeciej klatce filmu wideo zapisanego z szybkością 5. klatek na sekundę, otrzymując w ten sposób 50 punktów pomiarowych. Szybkość rejestracji filmu jest stosunkowo mała, ale odległość jaką po-konuje w tym czasie pojedyncza drobina jest niewielka, zatem nie ma sensu rejestrować filmów z większą szybkością.

3.6 Wyniki pomiarów wstępnych

Dzięki informacjom o położeniu *PX*, *PY* oraz czasie *t* uzyskanym z filmu wideo możliwe było wyliczenie przemieszczenia pojedynczej drobiny. Obliczeń i wizualizacji rezultatów dokonałem w arkuszu kalkulacyjnym $\text{Excel}^{\$}$.

W celu wyznaczenia wartości stałej Avogadra zarejestrowałem położenie 5. badanych drobin w poszczególnych chwilach eksperymentu. Pomiary zostały przeprowadzone z wykorzystaniem jednego, 30. sekundowego filmu wideo, na którym możliwa była obserwacja kilkudziesięciu różnych drobin.

Wyniki obserwacji posłużyły do obliczenia średniego kwadratu przemieszczenia cząstki z czasem – zależność ta, została przedstawiona na rysunku 3.6.1. Do wszystkich punktów pomiarowych dopasowałem prostą regresji przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Estymator współczynnika korelacji zmiennych losowych t i $\langle r^2 \rangle$ wyniósł R = 0,94, a więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o istnieniu liniowej zależności między tymi zmiennymi. Jednakże, zdając sobie sprawę z tego, że dopasowanie to może budzić kontrowersje, do zagadnienia tego wracam jeszcze podczas analizy wyników doświadczenia opisanego w kolejnej części niniejszego rozdziału.

Wyznaczona, z wartości współczynnika nachylenia linii prostej najlepszego dopasowania do wyników eksperymentalnych, wartość stałej Avogadro wynosi:

 $N_A = 6.01 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}, \qquad u(N_A) = 0.76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1},$

gdzie $u(N_A)$ – niepewność standardowa wyznaczonej wartości N_A [9]. Wynik ten w granicy niepewności pomiarowej pozostaje w zgodzie z wartością tablicową $6,022 \times 10^{23}$ mol⁻¹.



Rys. 3.6.1 Doświadczalna zależność średniego kwadratu przemieszczenia badanych drobin <*r*² > od czasu pomiaru. Wykres uzyskany z pomiarów dla 5. drobin w czasie 30 s.

3.7 Wnioski

Opisany układ pomiarowy oraz oprogramowanie służące do pomiarów wideo umożliwia realizację zaawansowanego doświadczenia studenckiego polegającego na badaniu praw rządzących zjawiskiem ruchów Browna i wyznaczeniu stałej Avogadra.

Otrzymany wynik pozostaje w zgodności z wartością tablicową. Należy jednak zaznaczyć, że prezentowana na rysunku 3.6.1 zależność doświadczalna odbiega znacząco od linii prostej. Mając na uwadze statystyczny charakter doświadczenia celowym wydaje się przeprowadzenie pomiarów dla większej liczby drobin. Należy także rozważyć możliwość dopasowywania do wyników eksperymentalnych prostych regresji nie przechodzących przez początek układu współrzędnych. Wnioski te uwzględniono podczas realizacji zadania doświadczalnego polegającego na wyznaczanie lepkości wodnych roztworów gliceryny.

Autor ma nadzieję, że wykorzystanie prezentowanej aparatury pozwoli na wszechstronne doskonalenie umiejętności doświadczalnych przyszłych fizyków.

W świetle otrzymanych rezultatów celowym wydaje się:

- zastosowanie kamery cyfrowej umożliwiającej otrzymanie filmów wideo o zdecydowanie lepszej jakości – stabilności i ostrości obrazu – co pozwoliłoby także na bezpośrednie rejestrowanie filmów na komputerze bez konieczności stosowania karty wideo;
- zwiększenie czasu obserwacji pojedynczej cząstki oraz liczby obserwowanych cząstek. Należy jednak pamiętać, że zwiększenie tych czynników znacząco wydłuży czas pomiaru, a zatem czas wykonywania ćwiczenia studenckiego. Podczas wydłużenia czasu obserwacji należy uwzględniać również fakt parowania badanego roztworu mający ogromny wpływ na warunki prowadzenia doświadczenia.

4. WYZNACZANIE LEPKOŚCI WODNYCH ROZTWORÓW GLICERYNY

4.1 Zestaw pomiarowy i procedura pomiarowa

Zestaw pomiarowy użyty w doświadczeniu jest identyczny jak w doświadczeniu wstępnym z tą różnicą, że zrezygnowano z monitora monochromatycznego. Tak zmodyfikowany zestaw pomiarowy prezentuje rys. 4.1.1. Procedura pomiarowa jest także identyczna jak w przypadku pomiarów wstępnych.

W stosunku do pomiarów wstępnych dokonano modyfikacji szkiełka mikrosko-



Rys. 4.1.1 Widok poszczególnych elementów zestawu do wyznaczania lepkości

powego, na które nanoszone są badane roztwory – rys. 4.1.2. Na szkiełko laboratoryjne o grubości $g = (1,9\pm0,1)$ mm naklejono folię samoprzylepną z wyciętym w niej otworem o średnicy $q = (5,5\pm0,1)$ mm, w którym umieszczany jest badany roztwór. Do wykonania otworu użyto dziurkacza biurowego. Układ po wypełnieniu roztworem jest przykrywany szkiełkiem nakrywkowym o grubości $c = (160\pm10)$ µm. Grubość folii wynosi $f = (100\pm10)$ µm, zatem uzyskano w ten sposób dwuwymiarową przestrzeń eksperymentalną ograniczoną płaszczyznami poszczególnych szkiełek laboratoryjnych.

W porównaniu do opisanego powyżej i przedstawionego na rys. 3.5.1 zestawu z pętlą metalową tak przygotowana przestrzeń eksperymentalna jest dużo bardziej trwała, przez co lepsza w zastosowaniu dydaktycznym. Dla wy-



Rys. 4.1.2 Widok szkiełka mikroskopowego z folią z wyciętym otworem, w którym umieszczono drut o znanej średnicy

skalowania odległości, do wnętrza przestrzeni eksperymentalnej wprowadzono metalowy drut o średnicy $d = (40\pm5) \mu m$, widoczny na rysunku 4.1.2. Drut taki można z łatwością nabyć w sklepie specjalistycznym lub odwinąć z miniaturowego przekaźnika niskiego napięcia. Na szkiełko nakrywkowe wprowadzono olejek immersyjny o współczynniku załamania dla światła białego n=1,515 (20°C) i całość umieszczono pod mikroskopem optycznym. Przed przystąpieniem do nagrywania filmów rejestrujących rzeczywiste ruchy Browna należy odczekać około minuty. Czas ten potrzebny jest by ciecz przestała płynąć wskutek ściskania szkłem laboratoryjnym i obiektywem mikroskopu. Taka, w dobrym przybliżeniu dwuwymiarowa, geometria układu pomiarowego uniemożliwia drobinom lateksowym przemieszczanie się w głąb roztworu, które prowadziłoby do utraty ostrości obrazu obserwowanej drobiny. W doświadczeniu zastosowano te same co w pomiarach wstępnych sferyczne drobiny lateksowe. Badania przeprowadzono dla trzech roztworów wodnych gliceryny o różnych stężeniach.

Następne kroki, w których zastosowano procedury pomiarów wideo były identyczne jak w doświadczeniu wstępnym.

4.2 Wyniki pomiarów

Na rysunku 4.2.1 przestawiono położenie jednej cząstki we współrzędnych (x, y) w poszczególnych chwilach podczas pomiaru.



Rys. 4.2.1 Położenie zarejestrowanej cząstki we współrzędnych kartezjańskich (x, y) w poszczególnych chwilach podczas pomiaru

Rysunek 4.2.2 prezentuje zależność średniego kwadratu przemieszczenia od czasu otrzymaną na podstawie badania ruchu 15. drobin. Na rysunku linią przerywaną zaznaczono prostą teoretyczną dla badanego układu wynikającą z równania Einsteina-Smoluchowskiego. Prosta teoretyczna i prosta regresji są niemal równoległe, co w opinii autora, można traktować jako argument za dopasowaniem do wyników eksperymentalnych prostej nie przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Dla takiego dopasowania otrzymuje się wartości estymatora współczynnika korelacji R większe od 0,95. Wyniki dla 15. drobin w przypadku roztworu o stężeniu 0% oraz 10. drobin w pozostałych przypadkach posłużyły do wyliczenia średniego przemieszczenia $\langle r^2 \rangle$ w funkcji czasu t. Wykresy dla 3. roztworów o różnych lepkościach, przedstawione na rysunku 4.2.3, mają charakter liniowy.

Tab. 4.2.1. Zestawienie wyników obliczeń oraz wartości tablicowych lepkości badanych roztworów, gdzie: *a* – współczynnik nachylenia prostej najlepszego dopasowania, u(a) – jego niepewność standardowa, η – lepkość, $u(\eta)$ – jej niepewność standardowa.

gęstość [x10 ³ kg/m ³]	stężenie gliceryny [%]	wartości tablicowe lepkości [x10 ⁻³ Pa·s]		a [x10 ⁻¹² m ² /s]	u(a) [x10 ⁻¹² m ² /s]	η [x10 ⁻³ Pa⋅s]	u(η) [x10 ⁻³ Pa⋅s]
	[,0]	20 °C	25 °C	,0]	,0]		
1,00	0	1,005	0,893	2,095	0,095	0,969	0,075
1,04	15	1,52	1,33	1,426	0,065	1,42	0,11
1,07	30	2,50	2,16	0,739	0,082	2,74	0,39



Rys. 4.2.2 Doświadczalna zależność wartości średniego kwadratu przemieszczenia badanych drobin <*r*² > od czasu pomiaru. Wykres uzyskany z pomiarów dla 15. drobin w czasie 30 s, linią przerywaną zaznaczono prostą teoretyczną.



Rys. 4.2.3 Doświadczalna zależność średniego kwadratu przemieszczenia $< r^2 >$ drobin od czasu pomiaru (30s) dla trzech roztworów o różnych stężeniach gliceryny ($\Box - 0\%$, $\circ - 15\%$, $\Delta - 30\%$)

Wartości lepkości otrzymane ze współczynników nachylenia prostych najlepszego dopasowania do wyników eksperymentalnych wraz z wartościami tablicowymi [29] zostały zebrane w tabeli 4.2.1.

Otrzymane wyniki, w granicach niepewności pomiarowych są zgodne z wynikami tablicowymi.

4.3 Wnioski

Zastosowanie techniki pomiarów wideo pozwoliło przygotować wartościowe doświadczenie studenckie umożliwiające wyznaczenie lepkości wodnych roztworów gliceryny na podstawie obserwacji zjawiska ruchów Browna.

Opisana procedura pomiarowa jest dużo mniej czasochłonna niż opisywana w pracy [13], zatem może być z powodzeniem przeprowadzona podczas zajęć laboratoryjnych w ramach studiów wyższych. Należy jednak pamiętać, że doświadczenie będzie wykonywane dla liczby drobin mniejszej od 10. stąd, ze względu na statystyczny charakter zjawiska, dopuszczalne są znaczące rozbieżności wyników otrzymanych przez różnych studentów. Niemniej jednak otrzymywane przez autora wyniki pozostają w zgodności z wartościami tablicowymi.

Tego rodzaju wyniki doświadczenia mogą być także użyte do wyznaczenia średnicy drobin lateksowych przy założeniu, że znane są pozostałe parametry zestawu doświad-czalnego.

5. PODSUMOWANIE

Opisane doświadczenia są przykładem zaawansowanych zestawów pomiarowych do wykorzystania w II Pracowni Fizycznej. Otrzymane rezultaty potwierdzają ich wartość zarówno z punktu widzenia praktyki doświadczalnej jak i dydaktyki szkoły wyższej.

6. PODZIĘKOWANIA

Autor dziękuje dr Izabeli Czekaj z Instytutu Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN w Krakowie za podarowanie roztworu drobin lateksowych oraz prof. Antoniemu Ciszewskiemu, dr. Piotrowi Mazurowi i mgr. Piotrowi Wieczorkowi za pomoc w przygotowaniu i realizacji doświadczenia.

IV. DOŚWIADCZENIE PROMIENIOWANIE RENTGENOWSKIE

1. **WSTĘP**

Badanie struktury krystalograficznej z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, będące ważnym zagadnieniem fizyki ciała stałego [30], stanowi doskonały temat doświadczenia studenckiego. Dostępne dotychczas źródła promieniowania rentgenowskiego, głównie ze względów bezpieczeństwa, mogły być obsługiwane jedynie przez osoby specjalnie do tego celu przeszkolone, a znaczne rozmiary urządzeń stanowiły poważną trudność w wykorzystaniu ich w pracowni studenckiej. Ostatnimi laty pojawił się na rynku europejskim aparat rentgenowski firmy *Phywe*, zaprojektowany i wykonany z myślą o zastosowaniu w pracowni studenckiej. W czwartym kwartale 2003 roku Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego zakupił taki aparat do celów dydaktycznych, co zaowocowało uruchomieniem w semestrze zimowym roku akademickiego 2003/2004 doświadczenia studenckiego zatytułowanego *Promieniowanie rentgenowskie*.

2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE

2.1 Promieniowanie Rentgenowskie

W roku 1895 Wilhelm Conrad Roentgen odkrył nowy rodzaj promieniowania powstającego przy bombardowaniu metalu strumieniem szybkich elektronów [31]. Promieniowanie to nosi obecnie nazwę promieniowania rentgenowskiego lub promieniowania X. Do najważniejszych własności tego, niewidzialnego dla oka, promieniowania należą duża przenikliwość, wywoływanie widzialnej fluorescencji, zaczernianie kliszy fotograficznej i jonizacja powietrza. Promieniowanie to wytwarza się w lampie rentgenowskiej zbudowanej z katody, będącej źródłem elektronów oraz umieszczonej naprzeciw niej antykatody. Dzięki wytworzeniu pomiędzy elektrodami różnicy potencjałów kilkudziesięciu kV, elektrony uzyskują znaczną prędkość przed zderzeniem z antykatodą. Widmo promieniowania rentgenowskiego jest ciągłe, ograniczone od strony fal krótkich (tzw. granica krótkofalowa) i zawiera piki charakterystyczne dla danego materiału antykatody. Występowanie w widmie promieniowania X granicy krótkofalowej jest konsekwencją istnienia maksymalnej, wynikającej z wartości potencjału przyspieszającego, energii elektronów hamowanych na antykatodzie. Piki charakterystyczne są natomiast związane z wartościami energii przejść dozwolonych dla elektronów w atomach materiału antykatody.

Promieniowanie rentgenowskie odegrało ważną rolę w rozwoju fizyki ciała stałego [32] i jest nadal z powodzeniem stosowane w szeregu badań [33, 34].

2.2 Stała Plancka i metody wyznaczania jej wartości

Stała Plancka, oznaczana przez h, to wielkość fizyczna wprowadzona po raz pierwszy przez Maxa Plancka w pracy na temat promieniowania ciała doskonale czarnego. Wiemy dziś, że wielkość to określa związek falowych i korpuskularnych własności cząstek materii. Planck zapostulował, że energia nie może być wypromieniowywana w sposób ciągły, a jedynie w postaci porcji – kwantów o wartości hv, gdzie v to częstość wypromieniowywanej fali elektromagnetycznej. Obecnie przyjmuje się, że wartość stałej Plancka to [35]:

$$h = 6,626\ 0755(40) \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}.$$

Wartość stałej Plancka można wyznaczyć badając zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne z zastosowaniem metody potencjału hamującego [8]. Wówczas prędkość fotoelektronów v dana jest zależnością

$$\frac{1}{2}m\upsilon^2 = eU_\lambda, \qquad (2.2.1)$$

gdzie: m – masa elektronu, e – jego ładunek a U_{λ} – potencjał hamujący. Korzystając następnie z równania Einteina

$$hv = \varphi + \frac{1}{2}mv^2$$
, (2.2.2)

w którym φ to praca wyjścia elektronów z metalu, możemy wyznaczyć wartość stałej Plancka.

Wyznaczenia stałej Plancka można dokonać także innymi metodami np. badając krótkofalową granicę ciągłego promieniowania rentgenowskiego. Wówczas rejestruje się zależność kąta poślizgu θ , odpowiadającego granicy krótkofalowej promieniowania, od wartości napięcia przyspieszającego U, dla którego wyznaczono tę granicę. Następnie wykorzystuje się proporcjonalność:

$$\sin\theta \propto \frac{1}{U},\tag{2.2.3}$$

do wyznaczenia wartości współczynnika nachylenia prostej najlepszego dopasowania do wyników eksperymentalnych. Znajomość tego współczynnika pozwala wyznaczyć stałą Plancka. Niniejsza metoda została użyta w opisanym poniżej doświadczeniu.

2.3 Poziomy energetyczne w atomie

Atom jest układem, który możemy zamodelować jako dodatnio naładowane jądro, skupiające w sobie prawie całą masę atomu i krążące na orbitach wokół niego elektrony [36]. Układ złożony z jądra i elektronów jest układem kwantowo-mechanicznym, pod-legającym prawom mechaniki kwantowej. Zatem energia elektronów przyjmować może tylko pewne, skwantowane wartości, a liczba i usytuowanie elektronów są ściśle określone i opisane liczbami kwantowymi. Schematycznie przedstawiono to na rysunku 2.3.1 (za [37]) w postaci poziomych kresek wykreślonych w odpowiednich miejscach pionowej osi energii.





Emisja promieniowania elektromagnetycznego z atomu występuje przy jego przejściach ze stanów o energii wyższej do stanów o energii niższej, natomiast absorpcja przy przejściach odwrotnych. Energia wypromieniowanego czy pochłoniętego kwantu promieniowania *hv* jest równa różnicy energii stanów, między którymi nastąpiło przejście. Najczęściej stosowaną jednostką energii w przypadku przejść atomowych jest elektronowolt, przy czym 1eV $\approx 1.6 \times 10^{-19}$ J.

2.4 Struktura krystalograficzna

Podczas idealnego wzrostu kryształów powstaje struktura, której poszczególne elementy składowe są identyczne [30]. Strukturę wszystkich kryształów można opisać za pomocą sieci, w której z każdym punktem (węzłem) jest związany jeden atom lub grupa atomów nazywana bazą. Sieć jest definiowana przez trzy podstawowe wektory translacji a_1 , a_2 , a_3 . Sieć nazywamy prymitywną (prostą), a wektory translacji podstawowymi, jeśli dwa dowolne wektory r i r' opisujące położenie punktów, z których układ atomów wygląda tak samo, spełniają zależność:

$$r' = r + u_1 \cdot a_1 + u_2 \cdot a_2 + u_3 \cdot a_3,$$
 (2.4.1)

gdzie u_1 , u_2 , u_3 są odpowiednio dobranymi liczbami całkowitymi. Komórka zbudowana na tak zdefiniowanych podstawowych wektorach translacji jest elementem składowym struktury krystalicznej o najmniejszej objętości. W przestrzeni trójwymiarowej punktowe grupy symetrii prowadzą do 14 różnych typów sieci, które przedstawiono w tabeli 2.4.1.

układ	liczba sieci	krawędzie i kąty w komórce umownej		
trójskośny	1	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha \neq \beta \neq \varphi$		
jednoskośny	2	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \phi$		
rombowy	4	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \varphi = 90^\circ$		
tetragonalny	2	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \varphi = 90^\circ$		
regularny	3	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \varphi = 90^\circ$		
romboedryczny (trygonalny)	1	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \phi < 120^\circ, \neq 90^\circ$		
heksagonalny	1	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \ \phi = 120^\circ$		

Tab. 2.4.1 Czternaście typów sieci trójwymiarowych

2.5 Dyfrakcyjne metody badania kryształów

Do badania struktury kryształów z zastosowaniem aparatu rentgenowskiego wykorzystuje się między innymi zjawisko dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego na periodycznej strukturze kryształu [38]. Obecność w promieniowaniu charakterystycznym materiału antykatody, wykonanej z miedzi (Cu), wyraźnych pików K^*_{α} i K_{β} , odpowiadających przejściom energetycznym o wartościach energii:

$$E^*_{K\alpha} = 8,038 \text{ keV},$$
 (2.5.1a)

$$E_{K\beta} = 8,905 \text{ keV},$$
 (2.5.1b)

pozwala wyznaczyć np. wartość parametru sieci badanego kryształu lub stałą Plancka. W tym celu należy określić wartości kątów, dla których obserwuje się w doświadczalnym dyfraktogramie maksima dyfrakcyjne a następnie wykorzystać warunek Bragga:

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda, \qquad (2.5.2)$$

gdzie: d – odległość pomiędzy płaszczyznami sieciowymi w krysztale, θ – kąt ugięcia wiązki promieniowania rentgenowskiego, λ – długość fali promieniowania charakterystycznego, n \in {1, 2, 3...} – rząd dyfrakcji.

Wartościom energii promieniowania charakterystycznego można przypisać długości fali zgodnie z zależnością:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \qquad (2.5.3)$$

gdzie: h – stała Plancka, c – prędkość światła, co w połączeniu z (2.5.1) oraz (2.5.2) daje:

$$2 \cdot \mathbf{E}^*_{\mathbf{K}\alpha} \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot h \cdot c, \qquad (2.5.4a)$$

$$2 \cdot \mathbf{E}_{\kappa\beta} \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot h \cdot c . \tag{2.5.4b}$$

Do dyfrakcyjnych metod badania kryształów należy zaliczyć także metodę Laue'go polegającą na badaniu wiązki o widmie ciągłym, ugiętej na kryształe oraz metodę obracanego kryształu, w której oświetlany promieniami X kryształ jest obracany [38]. Obie metody wymagają rejestracji obrazów dyfrakcyjnych badanego kryształu, np. z zastosowaniem kliszy fotograficznej lub licznika Geigera-Müllera.

3. APARAT RENTGENOWSKI

3.1 Charakterystyka aparatu

Aparat rentgenowski *Phywe X-ray unit 35 kV* spełnia normy bezpieczeństwa UE stawiane sprzętowi rentgenowskiemu przeznaczonemu do stosowania w pracowniach studenckich. W czasie pracy aparatu dawka promieniowania, w odległości 0,1 m od przyrządu, nie przekracza wartości 1 μ Sv/h [39]. Jest to wartość zbliżona do dawki promieniowania naturalnego. Ponadto urządzenie:

- a. ma budowę modułową, pozwalającą na przygotowanie szeregu różnorodnych doświadczeń,
- umożliwia pracę z trzema źródłami promieniowania rentgenowskiego o różnych materiałach antykatody,
- c. może być sterowane zarówno z wykorzystaniem komputera jak i ręcznie,
- d. pozwala na podłączenie analogowych urządzeń rejestrujących wyniki pomiaru.

3.2 Elementy aparatu rentgenowskiego

Rysunek 3.2.1 przedstawia aparat rentgenowski wraz z goniometrem i licznikiem Geigera-Müllera (G-M). W jego skład wchodzą:

- 1. komora eksperymentalna,
- 2. panel sterowania ręcznego,
- okno do obserwacji lampy rentgenowskiej,
- 4. wyświetlacze cyfrowe,
- lampa rentgenowska z anodą wykonaną z Cu,
- 6. ekran fluoroscencyjny,
- szuflada na dodatkowe wyposażenie,
- czerwony przycisk blokady przesuwu płyty wykonanej ze szkła akrylowego, zawierającego ołów.



Rys. 3.2.1 Widok aparatu rentgenowskiego z goniometrem i detektorem

Główny wyłącznik aparatu

oraz gniazdo przewodu zasilającego znajdują się z tyłu przyrządu.

Rysunek 3.2.2 przedstawia wnętrze aparatu rentgenowskiego, w którym znajdują się:

- przesuwana płyta szklana, która może być otwarta po zwolnieniu blokady; aparat rentgenowski pracuje tylko wówczas, gdy zasłona jest zamknięta,
- otwór umożliwiający mocowanie diafragm z otworami kołowymi dla wiązki promieniowania rentge-



Rys. 3.2.2 Widok wnętrza aparatu rentgenowskiego

nowskiego (diafragmy przechowywane są w szufladzie),
- para wejść umożliwiających doprowadzenie zasilania do przestrzeni eksperymentalnej z wejścia "INPUT", znajdującego się na panelu sterowania ręcznego,
- 4. złącze SUB-D do sterowania goniometrem; aparat musi być wyłączony podczas podłączania lub odłączania goniometru,
- 5. złącze BNC do podłączenia licznika G-M,
- 6. tunel wyprowadzający dodatkowe przewody na zewnątrz przestrzeni eksperymentalnej,
- ekran fluorescencyjny, wykonany ze szkła akrylowego zawierającego ołów pokryty luminoforem,
- 8. oświetlenie wewnętrzne,
- 9. otwory gwintowane, pozwalające umocować goniometr.

Goniometr jest wyposażony w dwa silniki krokowe, służące do niezależnego obracania próbki i licznika, pracujące w zakresie kątów od -10° do +170°, z minimalnym krokiem 0,1°. Możliwe jest ustawienie synchronicznego obracania licznika i próbki, w proporcji kątowej 2:1. Najważniejsze elementy goniometru zostały przedstawione na rysunku 3.2.3, są nimi:

- 1. elementy gwintowane umożliwiające zamocowanie goniometru wewnątrz aparatu rentgenowskiego,
- 2. uchwyt licznika G-M,
- 3. pokrętło umożliwiające unieruchomienie licznika w uchwycie,
- pokrętło blokujące przesuw uchwytu do i od próbki (osi obrotu),
- 5. diafragma licznika G-M,
- nakrętka mocująca diafragmę,
- ramiona, do których zamocowany jest układ detekcyjny, umożliwiające jego przesuwanie do i od osi obrotu (próbki).

Wysoka cena oraz niedostępność opisu, zarówno urzą-



Rys. 3.2.3 Widok goniometru

dzenia jak i oprogramowania, w języku polskim utrudnia bezpośrednie zastosowanie

urządzenia w pracowni studenckiej. Oferowane przez producenta oprogramowanie sterujące, gromadzące i prezentujące wyniki pomiarów również nie jest dostępne w języku polskim.

Autor wykonał tłumaczenie niezbędnych materiałów umożliwiających zastosowanie urządzenia w II PF UWr..

4. TWORZENIE STANOWISKA POMIAROWEGO

4.1 Wprowadzenie

W pierwszej kolejności zostały przygotowane materiały w języku polskim, umożli-

wiające zapoznanie się ze sposobem działania oraz obsługą urządzenia i oprogramowania. Producent oferuje bogatą literaturę jednakże, podobnie jak oprogramowanie, jest ona dostępna jedynie w języku niemieckim i angielskim.

Ze względu na wysoką cenę, oferowane przez producenta urządzenia, próbki do badań nie zostały zakupione. Zaprojektowano uchwyty na próbki, które zostały wykonane w warsztacie IFD a następnie przymocowano do nich próbki do badań studenckich, będące monokryształami NaCl (100), KBr (100), KCl (100) oraz LiF (100). Podstawki umożliwiają umieszczenie próbek w osi obrotu goniometru. Używane w doświadczeniach próbki widoczne są na rysunku 4.1.1.

Ponadto autor zaprojektował i wykonał przesłonę, w której umieszczono blachę niklową o grubości $g=(70\pm5) \mu m$ oraz tuleję do mocowania przesłony w aparacie rentgenowskim. Przesłona umożliwia usunięcie z promieniowania charakterystyczne-



Rys. 4.1.1 Próbki monokryształów



go lampy rentgenowskiej piku K_{β} . Rysunek 4.1.2 przedstawia przybliżone rozmiary opisywanych elementów. Przesłonę montuje się w uchwycie, który następnie umieszcza się na drodze promieniowania X (patrz rys. 3.2.2 element 2). Do uchwytu mocuje się oryginalną diafragmę z otworem kołowym. Stosując przesłonę z Ni należy pamiętać o dodatkowym odsunięciu goniometru od otworu lampy rentgenowskiej, by ramię z licznikiem G-M podczas ruchu nie mogło dotknąć przesłony.

4.2 Wyniki pomiarów

Przed udostępnieniem próbek studentom wykonałem pomiary, na podstawie których wyznaczyłem wartości odległości pomiędzy płaszczyznami sieciowymi w poszczególnych kryształach, wykorzystując warunek 2.5.4. Otrzymane wyniki były zbliżone do wartości tablicowych – rozbieżność niewiele przekraczała 1%. Zestawienie otrzymanych dla kryształu KBr wyników d_{exp} wraz z wartościami kątów θ , dla których zaobserwowano maksima dyfrakcyjne poszczególnych rzędów n dla linii K^*_{α} i K_{β} znajduje się w tabeli 4.2.1 (porównaj rys. 4.2.3).

Tab. 4.2.1 Odległości pomiędzy płaszczyznami sieciowymi d_{exp} oraz ich niepewności standardowe $u(d_{exp})$ dla KBr (100) wyznaczone na podstawie kątów θ , dla których obserwuje się braggowskie wzmocnienie pierwszych czterech rzędów dla linii K_{a} i K_{β} miedzi, g – waga wyników d_{exp} , wartość tablicowa d = 3,290×10⁻¹⁰m.

	K_{β}	K^{*}_{α}	$K_{\!eta}$	K^{*}_{α}	$K_{\!eta}$	K^{*}_{α}	$K_{\!eta}$	K^{*}_{α}
θ[°]	12,1	13,5	24,8	27,7	39,1	44,3	57,3	68,9
п		1	2		3		4	
<i>d_{exp}</i> [10 ⁻¹⁰ m]	3,32	3,33	3,32	3,32	3,30	3,30	3,31	3,31
<i>u(d_{exp})</i> [10 ⁻¹⁰ m]	0,071	0,079	0,15	0,17	0,27	0,32	0,52	0,86
g	20	16	4,2	3,3	1,4	0,95	0,37	0,14

Następnie opracowałem instrukcję do ćwiczenia studenckiego przygotowanego z myślą o dwóch zadaniach eksperymentalnych:

- a. Wyznaczanie stałej Plancka z krótkofalowej granicy promieniowania rentgenowskiego z wykorzystaniem kryształu NaCl lub LiF. Prowadzący zajęcia decyduje o rodzaju monokryształu, którego używa w ćwiczeniu student.
- b. Wyznaczanie parametru sieci wybranych monokryształów (NaCl (100), LiF (100), KBr (100), KCl (100)) w oparciu o rozkład kątowy promieniowania ugiętego na jednym z nich, przyjęty jako wzorcowy. Prowadzący decyduje, który z kryształów student przyjmuje jako wzorzec.

W wyniku realizacji pierwszej wersji doświadczenia studenci otrzymują serie punktów pomiarowych będących zależnością liczby zliczeń *I* detektora od kąta ugięcia θ wiązki promieniowania rentgenowskiego, dla napięć przyspieszających lampy rentgenowskiej z przedziału od 15 kV do 35 kV, co 2 kV. Rysunek 4.2.1 przedstawia dwie przykładowe krzywe pomiarowe uzyskane dla kryształu NaCl wraz z zaznaczonymi wartościami kątów ugięcia odpowiadających krótkofalowej granicy promieniowania rentgenowskiego.





Następnie studenci wyznaczają zależność sinusa kąta ugięcia, odpowiadającego granicy krótkofalowej promieniowania, od wartości odwrotności napięcia przyspieszającego 1/U, dla którego wyznaczono tę granicę. Zależność ta, znaleziona na podstawie wyników dla NaCl (100), jest przedstawiona na rysunku 4.2.2. Wyznaczona, z wartości współczynnika nachylenia $A = \frac{h \cdot c}{e}$ linii prostej najlepszego dopasowania do punktów pomiarowych, gdzie *c* to prędkość światła a *e* ładunek elementarny, wartość stałej Plancka wynosi:

$$h = 6,86 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, \quad U(h) = 0,34 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

U(h) to niepewność rozszerzona dla współczynnika rozszerzenia k = 2 [9].

Wynik ten w granicy niepewności pomiarowej pozostaje w zgodzie z wartością tablicowa wynosząca 6.63×10^{-34} J·s.



Rys. 4.2.2 Zależność doświadczalna wartości sinusa kąta poślizgu (sinθ) odpowiadającego granicy krótkofalowej promieniowania rentgenowskiego od wartości odwrotności napięcia przyspieszającego (1/U), dla którego wyznaczono tę granicę. Wykres uzyskano dla kryształu NaCl (100).

Obliczenia odległości między płaszczyznami sieciowymi, służących do wyznaczenia parametru sieci, student dokonuje także na podstawie zależności liczby zliczeń detektora od kąta ugięcia wiązki promieniowania rentgenowskiego, wykorzystując wzory (2.5.2–2.5.4).



Rys. 4.2.3 Dyfraktogram dla KBr (100) otrzymany przy napięciu przyspieszającym 35 kV, prądzie anodowym 1mA oraz czasie zliczania 2s.

Przykładowe wyniki doświadczalne otrzymane dla kryształu KBr (100) przedstawione są na rysunku 4.2.3 (dla przejrzystości nie zaznaczono słupków niepewności pomiarowych), a obliczone wartości d_{exp} zebrane są w tabeli 4.2.1. Średnia ważona – uwzględniająca wagę wyników otrzymanych dla różnych rzędów dyfrakcji – odległość pomiędzy płaszczyznami sieciowymi w tym krysztale wynosi:

$$\overline{d_g} = 3,33 \times 10^{-10} \text{ m}, \ u(d_g) = 0,11 \times 10^{-10} \text{ m},$$

Wynik ten w granicy niepewności standardowej $u(d_g)$ pozostaje w zgodzie z wartością tablicową.



Rys. 4.2.4 Dyfraktogram dla dwóch pierwszych rzędów otrzymany dla kryształu NaCl bez umieszczonej na drodze promieniowania X przesłony Ni

Kolejne dwa rysunki przedstawiają krzywe pomiarowe otrzymane dla dwóch pierwszych rzędów dyfrakcji na krysztale NaCl. W obu przypadkach dla przejrzystości rysunków nie zaznaczono słupków niepewności pomiarowych. Rysunek 4.2.4 przedstawia wyniki uzyskane w standardowej geometrii pomiarowej a rysunek 4.2.5 przy zastosowaniu dodatkowej niklowej przesłony ustawionej na drodze promieniowania X. W przeciwieństwie do przedstawionych na rysunkach 4.2.3 i 4.2.4 dyfraktogramach, dla których rejestrowane są dwa piki dla każdego rzędu dyfrakcji, na wykresie 4.2.5 widoczne są tylko pojedyncze piki dyfrakcyjne, odpowiadające linii K^*_{α} . Krzywa otrzymana w ten sposób jest bardziej czytelna. Niestety użycie przesłony zmniejsza intensywność piku dyfrakcyjnego. W przypadku prezentowanym na rysunku 4.2.4 zmniejszenie jest blisko dwukrotne.



Wyniki wszystkich pomiarów są opracowywane i analizowane przez studenta w domu i stanowią podstawę sprawozdania z realizacji doświadczenia. Szczegółowe wymagania stawiane studentom są określane przez prowadzącego zajęcia.

5. PODSUMOWANIE

Aparat rentgenowski *Phywe* oraz oprogramowanie sterujące i zbierające dane umożliwia realizację zaawansowanego doświadczenia studenckiego, polegającego na wyznaczaniu stałej Plancka z krótkofalowej granicy promieniowania rentgenowskiego oraz określaniu parametru sieci wybranych monokryształów. Otrzymywane wyniki pozostają w zgodności z wartościami tablicowymi. Obsługa urządzenia oraz oprogramowania nie sprawia studentom zasadniczych trudności, co w połączeniu z bezpieczeństwem użytkowania czyni narzędzie wartościowym przyrządem dydaktycznym. Wykorzystanie aparatu rentgenowskiego pozwala na wszechstronne doskonalenie umiejętności doświadczalnych a także zgłębianie zagadnień fizycznych związanych między innymi z promieniowaniem rentgenowskim, poziomami energetycznymi w atomie, strukturą krystalograficzną, dyfrakcyjnymi metodami badania kryształów, itp.

Budowa modułowa aparatu rentgenowskiego *Phywe* umożliwia stosunkowo szybkie przystosowanie urządzenia do innych doświadczeń wykorzystujących promieniowanie rentgenowskie. Możliwość nabycia źródeł promieniowania z antykatodą wykonaną z różnych materiałów pozwala na rozszerzenie zastosowania aparatu na przykład o badania własności promieniowania rentgenowskiego. Autor ma nadzieję, że w przyszłości uda się wykorzystać zbudowany zestaw doświadczalny także do badania struktury kryształów metodą Lauego.

6. PODZIĘKOWANIA

Autor dziękuje dyrektorowi IFD prof. Antoniemu Ciszewskiemu za znalezienie środków na współfinansowanie zakupu aparatu rentgenowskiego oraz dr. Piotrowi Mazurowi i mgr. Piotrowi Wieczorkowi za pomoc w przygotowaniu i realizacji doświadczenia.

V. DOŚWIADCZENIE EMISJA POLOWA

1. WSTĘP

Zjawisko emisji polowej stanowi ważny element w rozwoju teorii ciała stałego oraz technik doświadczalnych pozwalających na jego badanie [40]. Celowym wydawało się zatem stworzenie doświadczenia studenckiego umożliwiającego wykonywanie pomiarów z wykorzystaniem mikroskopu polowego. Autor prezentuje zastosowanie komercyjnej lampy mikroskopu polowego do konstrukcji stanowiska pomiarowego wykorzystywanego w II Pracowni Fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego. Stanowisko studenckie umożliwia obserwację powierzchni ostrza metalu (wolframu) oraz szacowanie zmian pracy wyjścia elektronów z czasem, będących efektem osadzania się na powierzchni ostrza atomów zawartych w gazach resztkowych. Układ doświadczalny umożliwia także wyznaczanie zmian pracy wyjścia z ostrza mikroskopu na skutek naparowania nań atomów Ba. Stanowisko wykorzystuje technikę cyfrowego przechwytywania i obróbki obrazu wideo. Autor ma nadzieję, że studenci wykonując konkretne zadania eksperymentalne i przygotowując doświadczenia od strony teoretycznej będą mieli możliwość ugruntowania zdobytej już wiedzy i umiejętności.

2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE

2.1 Elektronowa teoria budowy metali

Elektronowa teoria budowy metali została zaproponowana przez P. Drudego w 1900 r. [40] i opierała się na założeniu, że elektrony zlokalizowane na ostatniej orbicie atomów (tzw. elektrony wartościowości) tworzących metal poruszają się między jonami, podobnie jak atomy gazu zamkniętego w zbiorniku [41]. Uwspólnione elektrony zostały nazwane gazem elektronowym, który zgodnie z założeniem teorii miał podlegać prawom kinetycznej teorii gazów. Ponadto teoria ta zakładała równomierny rozkład ładunków dodatnich i istnienie bariery energetycznej na powierzchni metalu utrudniającej elektronom wyjście z przewodnika. Głównym sukcesem teorii Drudego było teoretyczne wyznaczenie liczby Lorenza w prawie Wiedemanna-Franza, według którego stosunek współczynników przewodnictwa cieplnego i elektrycznego jest proporcjonalny do temperatury bezwzględnej przewodnika. Teoria ta nie potrafiła jednak wyjaśnić otrzymywanych eksperymentalnie wartości ciepła właściwego – wyniki teoretyczne były zawyżone.

Podstawowe założenia teorii Drudego zostały przejęte przez teorię Sommerfelda [41], zaproponowaną w 1928 r. i wykorzystującą mechanikę falową. Według zmodyfikowanej teorii, całkowita energia gazu elektronowego przy temperaturach niższych od kilku tysięcy kelwinów jest w przybliżeniu stała. Natomiast ciepło właściwe gazu elektronowego jest wówczas proporcjonalne do temperatury bezwzględnej, a jego wkład do ciepła właściwego metalu znikomy. Jest to konsekwencją zastosowania do gazu elektronowego statystyki Fermiego-Diraca. Dzięki takiemu podejściu wartości ciepła właściwego przewidywane przez teorię Sommerfelda są zgodne z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie. Odstępstwa obserwowane są jedynie dla bardzo niskich temperatur.

Zgodnie z teorią pasmową [30], elektrony poruszające się w wytwarzanym przez jony potencjale okresowym, mogą przyjmować energie o wartościach układających się w tzw. pasma energetyczne. Pasma te rozdzielone są obszarami energii, w których nie ma dozwolonych stanów energetycznych elektronów. W energetycznym modelu pasmowym ciała stałego obszary te noszą nazwę przerw energetycznych lub przerw wzbronionych. Schematyczne obsadzenie dozwolonych pasm energii dla różnych ciał stałych przedstawia rysunek 2.1.1.



Rys.2.1.1 Schematyczne obsadzenie dozwolonych pasm energii (prostokąty) – zaciemnienie odpowiada obecności elektronów

2.2 Emisja polowa

Wyróżniamy następujące rodzaje emisji elektronów [42]: termoelektronowa – będąca efektem rozgrzania ciała, wtórna – zachodząca na skutek bombardowania ciała wiązką elektronów pierwotnych oraz polowa – spowodowana działaniem silnego pola elektrycznego. Zjawisko emisji polowej zwane także zimną emisją lub autoemisją zostało po raz pierwszy zaobserwowane i opisane szczegółowo przez R. W. Wooda w 1897 [43]. W roku 1922 J. Lilienfeld opisał zjawisko emisji prądu o natężeniu kilku miliamperów płynącego w wysokiej próżni z elektrody lampy rentgenowskiej [44]. Opis zjawiska, zaproponowany przez W. Schottky'ego, był tylko częściowo zgodny z faktami doświadczalnymi i dopiero L.W. Nordheim i R.H. Fowler kompleksowo wyjaśnili mechanizm zjawiska w oparciu o teorię tunelowego przejścia elektronów przez powierzchniową barierę potencjału [45]. Późniejsze lata przyniosły szerokie zastosowanie metody do badania powierzchni metali i półprzewodników oraz procesów na nich zachodzących.

2.3 Praca wyjścia i metody jej wyznaczania

Pracą wyjścia określa się wartość energii jaką należy dostarczyć pojedynczemu elektronowi znajdującemu się w ciele stałym, aby pokonał barierę potencjału na jego granicy i opuścił je. Do najczęściej wykorzystywanych sposobów wyznaczania pracy wyjścia należą metody[46]:

- a. kompensacji chłodzenia katody podczas zjawiska termoemisji,
- b. wyznaczania progu zjawiska fotoelektrycznego,
- c. wykorzystująca pomiar napięcia kontaktowego między badanym metalem a metalem o znanej wartości pracy wyjścia,
- d. prostych Fowlera-Nordheima.

Trzy pierwsze metody są obecnie stosowane bardzo rzadko. Czwarta metoda wykorzystywana w opisywanym doświadczeniu zostanie szerzej przedstawiona w paragrafie 3.

2.4 Mikroskop polowy – budowa i zasada działania

Mikroskop emisji polowej – narzędzie wykorzystujące zjawisko autoemisji skonstruowane po raz pierwszy przez E.W. Müllera – był pierwszym narzędziem umożliwiającym obserwację powierzchni ciała stałego w skali atomowej [47].

Mikroskop polowy to odpompowana bańka szklana, w której po-



wierzchnia anody, znajdująca się na wprost ostrza (katody), została pokryta materiałem fluorescencyjnym. Rysunek 2.4.1 przedstawia widok mikroskopu polowego używanego w opisywanym zestawie pomiarowym. Elektrony autoemisji rozchodzące się radialnie od ostrza tworzą jego obraz stereograficzny na powierzchni ekranu. W ten sposób możliwe jest badanie powierzchni materiału ostrza.

2.5 Interpretacja obrazów emisyjnych

Krystalograficzne grupy punktowe można przedstawić w postaci tzw. rzutów stereograficznych, które zostały wprowadzone do krystalografii w celu systematycznej klasyfikacji zewnętrznych powierzchni naturalnych kryształów [38]. Rzut stereograficzny konstruuje się zaznaczając na powierzchni hipotetycznej sfery otaczającej kryształ punkty jej przecięcia z normalnymi do wszystkich powierzchni kryształu, a następnie rzutując te punkty na płaszczyznę prostopadłą do osi symetrii o największej krotności. Punkty przecięcia, które znajdują się powyżej tej płaszczyzny, oznacza się figurami pełnymi, a te które leżą na powierzchni dolnej półkuli – figurami pustymi lub krzyżykami. Wybór figury sugeruje krotność osi symetrii, np. trójkąt reprezentuje oś trójkrotną, a kwadrat czterokrotną. W tej konwencji oś o największej krotności znajduje się zawsze w środku rzutu stereograficznego.

Jasne i ciemne obszary w obrazie emisyjnym obserwowanym w mikroskopie polowym odpowiadają poszczególnym płaszczyznom krystalograficznym materiału ostrza, zatem, w naturalny sposób, obserwowany jest rzut stereograficzny ostrza. Obserwując rzeczywiste obrazy stereograficzne należy jednak pamiętać, że kształt jasnych i ciemnych obszarów nie jest związany z krotnością osi symetrii, oraz że oś o największej krotności nie musi znajdować się w środku obrazu.

3. DOŚWIADCZENIE STUDENCKIE

3.1 Wprowadzenie

Przedstawione przez Schottky'ego wyjaśnienie zjawiska emisji polowej w oparciu o modyfikację bariery potencjału na granicy przewodnik – próżnia, wywołaną silnym polem elektrycznym oraz wpływem siły obrazowej działającej na elektron znajdujący się w pobliżu powierzchni metalu, pozwalało jedynie częściowo opisać zjawisko autoemisji. Punkt zwrotny w rozwoju zagadnienia emisji polowej stanowi praca L.W. Fowlera i R.H Nordheima, w której zjawisko to tłumaczone jest kwantowym efektem tunelowania elektronów przez barierę potencjału na granicy metal – próżnia. Rozważania zaproponowane przez autorów pracy [40] prowadzą do równania łączącego gęstość prądu emisji polowej *i* oraz natężenie zewnętrznego pola elektrycznego *E*

$$i = A \cdot E^2 e^{-\frac{B}{E}}, \qquad (3.1.1)$$

gdzie współczynniki *A* i *B* zawierają informację o pracy wyjścia elektronu oraz geometrii ostrza. Po zlogarytmowaniu wyrażenia (3.1.1) i uwzględnieniu napięcia *U*, pomiędzy anodą a katodą lampy, oraz natężenia prądu autoemisji *I* otrzymujemy

$$\ln \frac{I}{U^2} = \ln A' - \frac{B'}{U} \varphi^{\frac{3}{2}}, \qquad (3.1.2)$$

gdzie φ – oznacza pracę wyjścia z metalu ostrza, natomiast A' i B' – stałe aparaturowe.

Teoria ta została następnie zweryfikowana w szeregu doświadczeń i umożliwiła między innymi wyznaczenie pracy wyjścia z metali stanowiących ostrze lampy mikroskopu polowego [48].

3.2 Idea doświadczenia studenckiego

Jednoczesny pomiar napięcia przyłożonego do elektrod lampy mikroskopu polowego i natężenia prądu autoemisji pozwala sporządzić charakterystykę prądowo – napięciową urządzenia. Sporządzenie wykresu $\ln \frac{I}{U^2} = f\left(\frac{1}{U}\right)$ pozwala wykorzystać metodę regresji liniowej do wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej najlepszego dopasowania do wyników eksperymentalnych. Znajomość tego współczynnika wraz z założeniem, że znana jest średnia praca wyjścia elektronów z czystego wolframu, pozwala na wyznaczanie wartości zmian pracy wyjścia elektronów z badanego ostrza [48]. W opisywanym doświadczeniu dokonano pomiarów charakterystyki prądowo – napięciowej lampy mikroskopu polowego w różnych chwilach trwania eksperymentu.

Zastosowanie kamery cyfrowej i oprogramowania komputerowego umożliwiło zapisywanie obrazów ostrza z ekranu mikroskopu polowego. Obrazy te posłużyły jako ilustracje dla kolejnych etapów doświadczenia.

4. ZESTAW POMIAROWY

4.1 Charakterystyka zestawu

Do przygotowania zestawu pomiarowego zakupiono komercyjną lampę mikroskopu polowego, oferowaną przez LEYBOLD DIDACTIC GMBH nr katalogowy 554 60 [49]

oraz wykorzystano aparaturę znajdującą się w posiadaniu II Pracowni Fizycznej oraz Zakładu Fizyki Cienkich Warstw w IFD UWr. Ponadto wykonano obudowę lampy mikroskopu wraz z elementami służącymi do jej sterowania oraz uchwytem na cyfrową kamerę wideo. Rysunek 4.1.1 przedstawia poszczególne elementy zestawu pomiarowego, którymi są:

- zestaw komputerowy z systemem operacyjnym Windows 95 oraz oprogramowaniem do przechwytywania obrazów wideo FAST Capture i kartą video AV-Master Video v.2.5 FAST Multimedia (wewnątrz komputera);
- lampa mikroskopu polowego w obudowie wraz ze sterowaniem oraz uchwytem na cyfrową kamerę wideo MINTRON MS-1131c;
- nanoamperomierz prądu stałego MERA TRONIK V623 [zakres prądowy 0-300 nA];
- 4. zasilacz wysokiego napięcia POLON ZWN41 [zakres napięciowy 0-5 kV];
- wysokoprądowy zasilacz niskonapięciowy do zasilania źródła baru podczas naparowywania UNITRA UNIMA 5351 [maks. prąd 10 A, maks. napięcie 10 V];
- niskonapięciowy zasilacz służący do przegrzewania (oczyszczania) ostrza wolframowego lampy mikroskopowej VOLTCRAFT DIGI35 [maks. prąd 2,5 A, maks. napięcie 30 V].



Rys.4.1.1 Widok poszczególnych elementów zestawu pomiarowego

Schemat blokowy zestawu pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 4.1.2a, natomiast rysunek 4.1.2b prezentuje schemat połączeń elektrycznych lampy mikroskopowej – jej sterowanie. W tabeli 4.3.1 umieszczono dane techniczne dotyczące lampy mikroskopowej.

4.2 Procedura pomiarowa

Opisany zestaw pomiarowy umożliwia pomiar zmian pracy wyjścia elektronu z czystego ostrza wolframu z czasem oraz zmian pracy wyjścia wywołanych pokryciem ostrza atomami Ba, a także obserwację obrazów polowych ostrza. W procedurze pomiarowej można wyróżnić następujące etapy:

- oczyszczenie ostrza mikroskopu przez rozgrzanie go wskutek przepływu prądu o natężeniu 1,6 A w czasie 10 s – przełącznik w pozycji grzanie;
- podłączenie źródła wysokiego napięcia i ustawienie takiej wartości napięcia, dla której natężenie prądu emisji polowej wynosi 100 nA – przełącznik w pozycji *pomiar*;



Rys.4.1.2 a. Schemat blokowy zestawu pomiarowego
b. Schemat połączeń elektrycznych wewnątrz obudowy lampy:
FEM – lampa mikroskopu, Ba – źródło baru, a-c – kontaktrony wysokonapięciowe, d-e – przekaźniki niskonapięciowe, nA – nanoamperomierz prądu stałego, p – przełącznik trybu pracy

- 3. rejestracja obrazu ostrza mikroskopu;
- zdjęcie charakterystyki prądowo-napięciowej lampy mikroskopu składającej się z 8. par wyników. Napięcie zmniejszamy co 20 V poczynając od napięcia, dla którego prąd autoemisji wynosi 100 nA.

4.3 Elementy zestawu eksperymentalnego

Zgodnie z danymi technicznymi lampa mikroskopu umożliwia otrzymywanie powiększeń około 500000 razy. W celu zabezpieczenia przed uszkodzeniem mechanicznym lampa, wraz ze sterowaniem, została umieszczona w obudowie metalowej. Sterowanie lampy pozwala na pracę w dwóch trybach: *pomiar* (przełącznik p w pozycji dolnej) i *grzanie* (przełącznik p w po-

zycji górnej).

Takie podłączenie lampy różni się od proponowanego przez jej producenta i uniemożliwia obserwowanie obrazów mikroskopowych podczas naparowywania Ba na ostrze. Jednakże, w opinii autora, taka konfiguracja zwieksza bezpieczeństwo pracy i wydłuża żywotność lampy. Umieszczenie lampy i czułej kamery wideo w szczelnej obudowie pozwala prowadzić obserwacje i pomiary w jasnym pomieszczeniu oraz dla mniejszych niż w dotychczasowych pradów pomiarach autoemisji. Dzięki zamontowaniu w górnej części obudowy ruchomej pokrywy, oddzielonej od wnętrza płytą z pleksi, użytkownik ma możliwość obserwacji wnętrza układu i samej lampy. Rysunek 4.3.1 prezentuje widok wnętrza urządzenia. Układ sterowania lampy oraz cyfrowej kamery wideo wymaga zasilania prądem stałym (12V DC), które zrealizowano stosując uniwersalny zasilacz transformatorowy.

ab. 4.3.1	Dane techniczne	lampy mikroskopu	polowego
-----------	-----------------	------------------	----------

charakterystyka	wartość
powiększenie	~ 500000
rozdzielczość	(2-3) nm
promień krzywizny ostrza	(0,1-0,2) µm
średnica lampy	10 cm
ciśnienie wewnątrz lampy	~ 10 ⁻⁷ hPa
napięcie anodowe U _A	(4-8) kV
natężenie prądu anodowego I_A	~ 10 µA
natężenie prądu przegrzewania ostrza I _w	(1,6-1,9) A
natężenie prądu grzania źródła baru I _{Ba}	(7,5-8) A



Rys.4.3.1 Widok wnętrza obudowy lampy mikroskopu wraz z wyprowadzeniami i przekaźnikami układu sterującego

4.4 Etapy procedury pomiarowej

Zastosowanie kamery cyfrowej oraz komputera pozwala na bezpośrednią obserwację obrazów polowych ostrza mikroskopu. Możliwe jest także badanie zmiany pracy wyjścia z materiału ostrza będącej efektem upływu czasu oraz pokrycia ostrza barem. Indywidualne doświadczenia mogą przebiegać zgodnie z jedną z przedstawionych poniżej serii pomiarowych.

4.4.1. Pierwsza seria

Celem pomiarów jest ogrzanie ostrza, obserwacja jego obrazu polowego i określenie zmian pracy wyjścia elektronów z przegrzanego materiału ostrza oraz jej zmian wywołanych upływem czasu.

Aby zarejestrować obraz polowy czystego ostrza i określić odpowiadającą mu pracę wyjścia należy ostrze przegrzać. Dokonuje się tego przepuszczając przez pętlę, do której przymocowane jest ostrze, prąd o natężeniu 1,6 A przez 10 s. Autor zaleca przegrzewać ostrze w inny, niż sugerują to producenci lampy sposób, wynikający z doświadczeń z pracy z lampą, wstępnych pomiarów i analizy otrzymanych wyników.

Natychmiast po przegrzaniu ostrza do elektrod mikroskopu przykładane jest wysokie napięcie i rejestrowany jest obraz polowy. Napięcie to jest zwiększane do momentu, w którym wartość prądu zimnej emisji wynosi I=100 nA, a następnie jest zmniejszane skokowo w 8 krokach, każdorazowo o wartość $\Delta U=20$ V. Dla każdej wartości napięcia pomiędzy anodą i katodą notowana jest wartość natężenia prądu emisji. Tak otrzymane wyniki – 8 par napięć i odpowiadających im natężeń prądów – umożliwiają wykreślenie charakterystyki prądowo-napięciowej I=f(U) mikroskopu. Procedura pomiarowa – zmiana napięcia oraz odczyt wartości natężenia prądu – może być wykonana w czasie około pół minuty. Wyniki umożliwiają określenie zmian pracy wyjścia elektronów z metalu katody w sposób opisany w paragrafach 3.1 i 3.2.

Następnie rejestracja obrazów emisyjnych oraz procedura pomiarowa dla wyznaczenia zmian pracy wyjścia jest powtarzana dwukrotnie, po upływie 2 minut od czasu zakończenia wcześniejszych pomiarów.

4.4.2. Druga seria

Celem pomiarów w następnej serii jest ogrzanie ostrza, naparowanie nań atomów Ba, a następnie obserwacja obrazu emisyjnego oraz wyznaczenie zmian pracy wyjścia elektronów z materiału katody.

Procedura przegrzania ostrza oraz rejestracji jego charakterystyki prądowonapięciowej jest identyczna jak w pierwszej serii pomiarowej. Następnie ostrze jest pokrywane atomami Ba pochodzącymi ze źródła, które rozgrzewane jest poprzez przepuszczenie przez nie prądu o natężeniu $I_{Ba}=8$ A w czasie 20 s. I tym razem sposób ogrzewania ostrza odbiega od proponowanego przez producenta i został zmodyfikowany po uwzględnieniu wyników pomiarów wstępnych, wykonanych dla różnych sposobów rozgrzewania źródła Ba.

Natychmiast po zakończeniu procedury naparowywania, do elektrod mikroskopu przykładane jest wysokie napięcie i rejestrowany jest obraz emisyjny. Następnie przeprowadzany jest pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej umożliwiający wyznaczenie zmian pracy wyjścia w sposób identyczny jak opisany dla pierwszej serii pomiarów. Procedura pomiarowa i rejestracja obrazów powtarzana jest jeszcze dwukrotnie, każdorazowo po upływie 2 minut od zakończenia wcześniejszego pomiaru, aby wyznaczyć zmianę pracy wyjścia wywołaną upływem czasu.

4.4.3. Trzecia seria

W tej serii pomiarowej ostrze mikroskopu jest wygrzewane, a następnie dwukrotnie – w odstępach czasowych – naparowywane ze źródła Ba. Po pomiarach napięcia i odpowiadającego im natężenia prądu autoemisji dla ostrza tuż po przegrzaniu, ostrze jest naparowywane ze źródła Ba, a następnie przeprowadzane są pomiary umożliwiające wyznaczenie zmian pracy wyjścia elektronów. Tuż po nich ostrze zostaje naparowane ponownie i ponownie powtarzane są opisane powyżej czynności mające na celu wyznaczenie zmian pracy wyjścia elektronów z materiału katody.

4.4.4. Czwarta seria

Jedyną różnicą pomiędzy czwartą i trzecią serią pomiarową jest czas pomiędzy kolejnymi naparowaniami Ba. W tym przypadku, po upływie 2 minut od chwili zakończenia pierwszego naparowania Ba na przegrzane ostrze oraz pomiaru jego charakterystyki prądowo-napięciowej przeprowadzane są pomiary pozwalające ponownie wyznaczyć pracę wyjścia. W ten sposób możliwe jest określenie zmiany pracy wyjścia katody naparowanej Ba z upływem czasu. Następnie procedura naparowywania Ba jest powtarzana, a po niej następują dwa pomiary umożliwiające wyznaczenie zmian pracy wyjścia z upływem czasu. Pomiary dokonywane są analogicznie w odstępie 2 minut od zakończenia wcześniejszego pomiaru.

4.4.5. Piqta seria

Celem ostatniej serii pomiarowej jest rejestracja zmian prądu emisyjnego mikroskopu polowego z czasem dla ostrza tuż po przegrzaniu oraz dla ostrza naparowanego Ba. W tym celu ostrze jest czyszczone w sposób wcześniej opisany, a następnie pomiędzy anodą i katodą przykładane jest wysokie napięcie o wartości wywołującej przepływ prądu zimnej emisji o natężeniu *I*=100nA. Od tej chwili rejestrowana jest wartość natężenia prądu emisji i odpowiadający jej czas aż do chwili, w której wartość natężenia maleje do 20 nA. Następnie ostrze jest przegrzewane i pokrywane atomami Ba w sposób opisany powyżej, a następnie w identyczny sposób rejestrowana jest zmiana natężenia prądu zimnej emisji dla ostrza pokrytego Ba.

5. WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI

Typowe wyniki eksperymentalne, w formie prostych Fowlera-Nordheima, zaprezentowane są na rysunku 5.1, podczas gdy rysunek 5.2 przedstawia obrazy emisyjne otrzymane w kolejnych krokach pierwszej serii pomiarowej.

Wartości pracy wyjścia φ dla materiału ostrza, badane w seriach pomiarowych 1-4, zostały wyznaczone ze współczynników nachylenia prostych Fowlera-Nordheima, których równanie (3.1.2) zapisano w postaci

$$\ln\left(\frac{I}{U^2}\right) = \ln \alpha + \beta \varphi^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{U}, \qquad (5.1)$$

gdzie *I* to natężenie prądu emisyjnego, *U* – napięcie przyłożone do lampy, α i β – stałe aparaturowe. W celu wyznaczenia wartości stałej β wykorzystano wartość współczynnika nachylenia prostej Fowlera-Nordheima, w układzie współrzędnych $\left(\frac{1}{U}, \ln \frac{I}{U^2}\right)$, dla wolframu tuż po przegrzaniu i przyjęto, że wartość β nie zmienia się w czasie a średnia praca wyjścia z czystego wolframu wynosi $\varphi = (4,54 \pm 0,05)$ eV [50].

Dla każdej wyliczonej wartości pracy wyjścia oszacowano niepewność pomiarową zgodnie z sugestiami i nomenklaturą rekomendowaną przez ISO [9]. Przypadek ten jest szczególnie interesujący ze względu na korelację pomiędzy wartościami niepewności dla obydwu zmiennych na wykresie 5.1. Różni autorzy prowadzą szacowanie niepewności dla tego rodzaju wyników pomiarów w różny sposób [51, 52]. W swoim oszacowaniu niepewności pracy wyjścia dokonałem komputerowej symulacji naśladującej rzeczywistą sytuację. Osiem par wyników eksperymentalnych (U_i , I_i), i=1,2,....8, posłużyło do wyznaczenia równania prostej najlepszego dopasowania do wyników przedstawionych w układzie (1/U, $\ln(I/U^2)$). Na podstawie równania tej prostej regresji utworzyłem osiem par wyników "idealnych" (U_{ir} , I_{ir}), i=1,2,....8. Na tej bazie wygenerowałem, w sposób losowy, wyniki dla dziesięciu serii pomiarowych $U_{ik} = U_{ir} + \Delta U R_{ik}$ i

 $I_{ik} = I_{ir} + \Delta I R_{ik}$, k = 1, 2,...., 10, dla których ΔU i ΔI są maksymalnymi wartościami niepewności pomiaru napięcia U i natężenia prądu I, natomiast R_{ik} są losowo generowanymi, z zakresu <0, 1>, wartościami zmiennej losowej o rozkładzie jednostajnym. Otrzymane w ten sposób wartości pseudoeksperymentalne (U_{ik} , I_{ik}) zostały użyte do wykreślenia dziesięciu wykresów w układzie (1/U, $\ln(I/U^2)$), dla których, metodą najmniejszych kwadratów, wyznaczyłem równania prostych najlepszego dopasowania (równanie 5.1). Następnie obliczyłem średnią arytmetyczną współczynników nachylenia tych prostych oraz jej niepewność standardową. W równaniu 5.1 współczynnik kie-

runkowy prostej ma postać $\beta \phi^{\frac{1}{2}}$, zatem złożoną niepewność standardową pracy wyjścia $u_c(\phi)$ obliczyłem z prawa przenoszenia niepewności standardowych – niepewność β wyliczyłem na podstawie wyników dla czystego wolframu. Złożona niepewność standardowa pracy wyjścia $u_c(\phi)$, wyznaczona z zastosowaniem opisanej powyżej metody, wynosi $u_c(\phi) = 0,08$ eV i jest niemal identyczna z niepewnością otrzymaną z bezpośredniego dopasowania prostej do rzeczywistych wyników eksperymentalnych zamieszczonych na wykresie 5.1. Jak widać otrzymałem dobrą zgodność pomiędzy niepewnością pracy wyjścia uwzględniającą korelację pomiędzy niepewnościami zmiennych oraz niepewnością nie uwzględniająca tej korelacji.



Rys. 5.1 Zależności $\ln(I/U^2) = f(1/U)$ dla oczyszczonego ostrza wolframu (z prawej) oraz po 2,5, 5 i 7,5 minutach

Tak więc przy wyznaczaniu zmian pracy wyjścia i jej niepewności metoda prostych Fowlera-Nordheima możemy nie uwzględniać korelacji między niepewnościami (1/U) i $\ln(I/U^2)$.

Tab. 5.1. Wartości pracy wyjścia ϕ (w eV) otrzymane dla poszczególnych serii pomiarowych (1-4) dla czyste	go
wolframu [50] oraz wolframu pokrytego atomami Ba. Złożona niepewność standardowa wartości pra	acy
wyjścia dla wszystkich przypadków wynosi $u_c(\phi) = 0.08 \text{ eV}$.	

nr serii	czyste	ostrze pokryte	po upływie	po kolejnych	ostrze po-	po upływie
	ostrze W	Ва	2,5 min	2,5 min	kryte Ba	2,5 min
1		-	4,73	4,81	-	4,89
2	4 54(05)	4,38	4,52	4,56	-	-
3	1,01(00)	4,42	-	-	4,43	-
4		4,35	4,46	-	4,42	4,50



Rys. 5.2 Obrazy ostrza wolframu z mikroskopu polowego wykonane bezpośrednio po przegrzaniu ostrza – 1, oraz po kolejnych 2,5 minutach (2-4)

W tabeli 5.1 zebrano wartości pracy wyjścia (w eV), otrzymane dla serii pomiarowych 1-4. Wartość $\varphi = (4,54 \pm 0,05)$ eV dla przegrzanego ostrza W została wzięta z literatury [50]. Wyniki piątej serii pomiarowej zostały zaprezentowane w postaci wykresu *I=I(t)* na rysunku 5.3.

Rysunek 5.2 prezentuje obrazy otrzymane za pomocą mikroskopu w poszczególnych fazach pierwszej serii eksperymentu. Na rysunku wyraźnie widać, że wraz z upływem czasu ciemne pole w kształcie krzyża (tzw. krzyż tlenowy), będące efektem osadzania

się na ostrzu mikroskopu atomów resztkowych, szczególnie tlenu, powiększa się. Pomiary zmian natężenia prądu emisyjnego z czasem (otrzymane w piątej serii pomiarowej) pokazują inne zachowanie się wartości tego natężenia dla ostrza czystego i pokrytego atomami Ba, szczególnie po upływie kilku minut. Natężenie prądu emisyjnego z czystego ostrza maleje z czasem szybciej niż ma to miejsce dla ostrza pokrytego Ba co, w opinii autora, jest efektem wzrostu ciśnienia wewnątrz lampy mikroskopu polowego wskutek podgrzewania źródła Ba.

Otrzymane w pierwszej serii pomiarowej wartości pracy wyjścia wskazują na jej wyraźny wzrost po upływie 2,5 min oraz dalszą, niewielką tendencję wzrostową wraz z upływem czasu. Takie zachowanie może świadczyć o niewystarczającej próżni wewnątrz lampy mikroskopu. Przypuszczenie to znajduje swoje uzasadnienie również w wynikach zmian pracy wyjścia ostrza wywołanych naparowaniem na nie atomów Ba, co potwierdzają wyniki kolejnych serii pomiarowych.



Rys. 5.3 Zmiany wartości prądu emisyjnego z czasem dla ostrza wolframowego tuż po przegrzaniu (trójkąty) oraz ostrza pokrytego Ba (kwadraty). Słupki niepewności nie wykraczają poza użyte symbole.

6. PODSUMOWANIE

Opisany układ pomiarowy oraz oprogramowanie do przechwytywania obrazów wideo umożliwia realizację zaawansowanego doświadczenia studenckiego polegającego na obserwacji obrazu polowego ostrza wolframowego mikroskopu emisji polowej tuż po jego przegrzaniu oraz wyznaczaniu zmian pracy wyjścia wraz z upływem czasu i pokryciem ostrza atomami Ba.

Otrzymywane wyniki wskazują, że wartość pracy wyjścia elektronów z przegrzanego, jak i pokrytego Ba, ostrza wolframowego wyraźnie rośnie po 2,5 minutach od chwili zakończenia procesu formowania ostrza oraz wykazuje dalszą, niewielką tendencję wzrostową wraz z upływem czasu. Uważam, że takie wyniki są rezultatem zbyt wysokiego ciśnienia wewnątrz lampy mikroskopu.

Prezentowane wyniki pomiarów są zgodne z obserwacjami innych autorów, dla których pokrycie ostrza wolframu atomami Ba prowadzi do obniżenia pracy wyjścia elektronów z ostrza. Jednak obserwowana przez mnie zmiana jest blisko 10 razy mniejsza od otrzymywanej w innych doświadczeniach [53]. W opinii autora, zbyt mała zmiana pracy wyjścia elektronów z materiału ostrza jest wynikiem niedostatecznej jakości próżni wewnątrz lampy mikroskopu polowego. Prawdopodobnie zastosowanie innego egzemplarza lampy pozwoliłoby otrzymywać rezultaty bardziej zgodne z teorią. Przypuszczenie to znajduje potwierdzenie w obrazach emisyjnych zarejestrowanych w doświadczeniu i pokazanych na rysuneku 5.2. Wyraźnie widać na nich, że wraz z upływem czasu ciemne pole w kształcie krzyża, będące efektem osadzania się na ostrzu mikroskopu atomów resztkowych, powiększa się.

Otrzymane rezultaty doświadczalne pozwalają sądzić, że zastosowanie komercyjnej – oferowanej przez Leybold Didactics – lampy mikroskopu polowego pozwala nie tylko obserwować obraz emisyjny ostrza wolframowego, ale także przeprowadzać ilościowe pomiary zmian pracy wyjścia materiału ostrza. Ponadto wyniki uświadamiają nam jak ważną rolę podczas tego rodzaju doświadczeń odgrywa jakość próżni wewnątrz lampy mikroskopu polowego. Mimo zbyt wysokiego ciśnienia wewnątrz lampy, mikroskop pozwala na obrazowanie powierzchni ostrza oraz doskonalenie umiejętności wyznaczania zmian pracy wyjścia w oparciu o teorię Fowlera-Nordheima.

Każda z opisanych serii pomiarowych może być traktowana jako oddzielne zadanie doświadczalne, co zwiększa funkcjonalność zestawu pomiarowego i jego wartość dydaktyczną w zaawansowanej pracowni fizycznej. Autor uważa, że tego rodzaju doświadczenie studenckie pozwala na zgłębianie przez studenta wiedzy oraz kształtowanie umiejętności doświadczalnych, w szczególności dostrzeganie jak wiele czynników może wpływać na przebieg doświadczenia. Eksperyment pozwala także na kształtowanie umiejętności oceny niepewności pomiarowych.

7. PODZIĘKOWANIA

Autor dziękuje dyrektorowi IFD prof. Antoniemu Ciszewskiemu za znalezienie środków na współfinansowanie zakupu lampy mikroskopu oraz dr. Piotrowi Mazurowi i mgr. Piotrowi Wieczorkowi za pomoc w przygotowaniu i realizacji doświadczenia.

VI. DOŚWIADCZENIE MAKROSKOPOWY MODEL MIKROSKOPU SIŁ ATOMOWYCH

1. WSTĘP

Mikroskop sił atomowych – AFM (ang. *Atomic Force Microscope*) – to rodzaj mikroskopu skaningowego – SPM (ang. *Scanning Probe Microscope*) – umożliwiającego uzyskanie obrazu powierzchni badanej próbki, ze zdolnością rozdzielczą rzędu rozmiarów pojedynczych atomów. Mikroskop AFM został skonstruowany stosunkowo niedawno, bo w roku 1986 przez G. Binninga, C. F. Quate'a oraz Ch. Gebera [54]. Początkowo był on rozszerzeniem skaningowego mikroskopu tunelowego – STM (ang. *Scanning Tunneling Microscope*) – umożliwiającym badanie powierzchni izolatorów. Jednakże w następnych latach dokonano wielu modyfikacji i usprawnień czyniąc z AFM jeden z podstawowych przyrządów do badania ciała stałego [55, 56]. Z tych względów AFM stanowi wartościowe narzędzie do wykorzystania w zaawansowanej pracowni fizycznej. Niestety wciąż wysokie ceny tego rodzaju urządzeń uniemożliwiają ich zakup i zastosowanie w zaawansowanej studenckiej pracowni fizycznej.

Autor, korzystając z idei autorów publikacji [57] zbudował makroskopowy model mikroskopu sił atomowych (MAFM). Model posłużył do przygotowania wartościowego studenckiego stanowiska doświadczalnego.

Niniejszy rozdział prezentuje zastosowanie MAFM do konstrukcji stanowiska pomiarowego wykorzystywanego w zaawansowanej pracowni fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego. Stanowisko wykorzystuje także komputer jako narzędzie do sterowania procesem pomiarowym oraz gromadzenia i obróbki wyników. Autor sądzi, że studenci wykonując prezentowane zadania eksperymentalne i przygotowując się do doświadczenia od strony teoretycznej będą mieli możliwość poszerzania swojej wiedzy i umiejętności.

2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE

2.1 Drgania pręta zamocowanego jednostronnie

Rozważmy jednorodny pręt w kształcie walca, którego przekrój jest symetryczny względem płaszczyzny równoległej do jego wysokości, przechodzącej przez środek podstawy [58]. Ponieważ przy gięciu pręta jedna z warstw, z założenia nieskończenie cienka, nie ulega wydłużeniu ani skróceniu, nazywamy ją warstwą neutralną. Warstwy odległe od warstwy neutralnej o z po stronie wklęsłej ulegaja skróceniu (ściśnięciu) natomiast znajdujące się po stro-



Rys. 2.1.1 Odkształcany pręt o przekroju walca (odkształcenie na rysunku jest przesadne)

nie wypukłej ulegają wydłużeniu. Opisywaną sytuację przedstawia rysunek 2.1.1. Skrócenie warstw odległych od siebie o dx – mierząc wzdłuż warstwy neutralnej, zależy od kąta $d\varphi$ między odkształcanymi przekrojami. Zgodnie z prawem Hooke'a na warstwę o polu przekroju dS i długości dx działa siła o wartości:

$$dP = \frac{z \cdot E \cdot dS \cdot d\varphi}{dx}$$

gdzie E oznacza moduł Younga,

moment tej siły względem warstwy neutralnej ma wartość:

$$dM = \frac{z^2 \cdot E \cdot dS \cdot d\varphi}{dx}.$$
 (2.1.1)

Całkowity moment gnący wyrażony poprzez współrzędną *y* warstwy neutralnej względem jej położenia dla pręta nieodkształconego (*y*=0) wynosi:

$$M = -E \cdot B \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \qquad (2.1.2)$$

co wynika ze scałkowania wzoru 2.1.1, oznaczenia momentu bezwładności przekroju poprzecznego pręta względem warstwy neutralnej przez B ($B = \int z^2 \cdot dS$), oraz zapisa-

nia
$$d\varphi$$
 w postaci $d\varphi = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_x - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x+dx} = -dx \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)$

Moment gnący M wzrasta o dM wraz ze wzrostem x o dx, zatem siła poprzecznego ścinania może zostać wyznaczona z zależności:

$$F = \frac{\partial M}{\partial x} = -E \cdot B \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}.$$
 (2.1.3)

Na element objętości między x i x+dx działa siła:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx = -E \cdot B \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} dx \quad . \tag{2.1.4}$$

Z II zasady dynamiki Newtona:

$$dF = \rho \cdot S \cdot dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \qquad (2.1.5)$$

gdzie ρ to gęstość materiału pręta.

Łącząc (2.1.4) i (2.1.5) otrzymujemy:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{\rho}{E \cdot \varepsilon^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$
(2.1.6)

gdzie $\varepsilon = \sqrt{\frac{B}{S}}$ nosi nazwę *promienia bezwładności* przekroju S. Równanie to, choć nie

jest równaniem falowym, pozwala stwierdzić, że w pręcie może rozchodzić się, z prędkością *c*, fala postaci:

$$y = A \cdot \cos\left(\omega \left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$$

Jedno z rozwiązań równania (2.1.6) dla nieskończonego pręta prowadzi do wyniku postaci:

$$\frac{\omega^4}{c^4} y = \frac{\omega^2 \rho}{\varepsilon^2 E} y$$

skąd $c = \sqrt[4]{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\omega \cdot \varepsilon}$. W przypadku tym mamy do czynienia z dyspersją fali poprzecznej

w pręcie.

Dla pręta o skończonej długości *l* zamocowanego jednostronnie tak, że $x \in \langle 0, l \rangle$ należy rozważyć następujące warunki brzegowe:

- dla x=0 (koniec zamocowany), y=0 oraz $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$ (zamocowanie sztywne),
- dla x=l (koniec swobodny), M=0 oraz F=0 (znika moment gnący i siła ścinająca).

Przepisując równanie (2.1.6) w formie:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{\gamma^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \qquad (2.1.7)$$

(2.1.8)

gdzie

możemy znaleźć rozwiązania postaci: $y = Y(x)e^{-i\cdot\omega t}$. Po separacji zmiennych powstaje

 $\gamma^2 = \frac{E \cdot \varepsilon^2}{\rho},$

$$\frac{\partial^4 Y}{\partial x^4} = \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 \cdot Y$$

Całka ogólna tego równania ma postać:

równanie dla funkcji Y(x):

$$Y = C_1 e^{\mu x} + C_2 e^{-\mu x} + C_3 e^{i\mu x} + C_4 e^{-i\mu x}, \qquad (2.1.9)$$

gdzie

$$\mu^{4} = \frac{\omega^{2}}{\gamma^{2}}.$$
 (2.1.10)

Przyjmując $a=C_1-C_2$ i $b=C_1+C_2$ możemy (2.1.8) zapisać w formie trygonometrycznej jako:

 $Y = a \cdot sinh\mu x + b \cdot cosh\mu x + p \cdot sin\mu x + q \cdot cos\mu x.$

Uwzględniając warunki brzegowe, z których wynika że q=-b i p=-a możemy rozwiązanie (2.1.9) zapisać w formie:

 $Y=a(sinh\mu x - sin\mu x) + b(cosh\mu x - cos\mu x).$

Podstawiając to wyrażenie do $y = Y(x)e^{-i\cdot\omega t}$ oraz korzystając z warunków brzegowych dochodzimy do układu równań:

$$\begin{aligned} a(\sinh\mu l + \sin\mu l) + b(\cosh\mu l + \cos\mu l) &= 0, \\ a(\sinh\mu l + \cos\mu l) + b(\sinh\mu l - \sin\mu l) &= 0, \end{aligned}$$

skąd:

$$\frac{a}{b} = \frac{\sin\mu l - \sinh\mu l}{\cos\mu l + \sinh\mu l} = -\frac{\cos\mu l + \cosh\mu l}{\sin\mu l + \sinh\mu l}$$

Układ równań jest jednorodny, wobec czego warunkiem rozwiązywalności jest znikanie wyznacznika macierzy:

$(\sinh \mu l + \sin \mu l)$	$\cosh(\mu l + \cos(\mu l))$	
$\sinh \mu l + \cos \mu l$	sinhµl-sinµl	•

Zatem:

$$(sinh\mu l)^{2} - (sin\mu l)^{2} - (cosh\mu l + cos\mu l)^{2} =$$
$$(sinh\mu l)^{2} - (cosh\mu l)^{2} - (sin^{2}\mu l + cos^{2}\mu l) - 2cos\mu l \cdot cosh\mu l = -2 - 2cos\mu l \cdot cosh\mu l = 0$$

Parametr μ znajdujemy rozwiązując równanie:

$$1 + \cos \mu l \cdot \cosh \mu l = 0.$$

Pierwiastki tego równania można zapisać w ogólnej postaci:

$$\mu_{s} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot (2k-1) - (-1)^{k} \cdot \alpha_{k}}{l} = \frac{\mu_{k}}{l}, \qquad (2.1.11)$$

gdzie α_k to małe odchylenie, które dla k=3 ma wartość $\alpha_3 < 10^{-4}$. Pierwsze 7 liczb falowych μ_k oraz wartości $n_k = \frac{\mu_k^2}{\mu_1^2}$ zestawiono w tabeli 5.1.

Jeśli pominiemy odchylenie α_k wówczas μ_k w (2.1.11) można zapisać w postaci:

$$\mu_k \approx \frac{\pi}{2} \cdot (2k-1).$$

Wyznaczenia częstotliwości drgań pręta f_k można dokonać znając kształt jego pola przekroju, długość l, gęstość materiału, z którego został wykonany ρ oraz moduł Younga E dla tego materiału. Korzystając z oznaczeń (2.1.8) i (2.1.10) można zapisać wzór pozwalający wyznaczyć częstości drgań własnych odpowiadających kolejnym możliwym wartościom μ_s :

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi} = \frac{\varepsilon}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \mu_s^2,$$

Dla kołowego przekroju poprzecznego pręta o promienia *r*, promień bezwładności $\varepsilon = r/2$, zatem prawdziwa jest zależność:

$$f_k = n_k \frac{1}{4\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \mu_1^2 \quad . \tag{2.1.12}$$

Powyższy wzór pozwala obliczyć częstotliwości drgań pręta. Dokonując podstawień: masa pręta $m = \pi \cdot r^2 \rho l$, jego efektywny współczynnik sprężystości $k = \frac{3EI}{l^3}$, gdzie $I = \frac{1}{4}\pi \cdot r^4$ oznacza moment bezwładności przekroju względem jego osi obojętnej, otrzymujemy [59]:

$$f_k = n_k \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{3m} \mu_1^4} \,. \tag{2.1.13}$$

Zatem częstotliwości drgań własnych pręta jednostronnie zamocowanego są zgodne z relacją dyspersyjną, według której $f_k \propto n_k$. Nie są one natomiast całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej – wypadkowe drganie pręta jest nieperiodyczne.

Jeśli do swobodnego końca belki zostanie dodana punktowa masa m_p wówczas wzór 2.1.13 przyjmie postać [60]:

$$f_k = n_k \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{3m/\mu_1^4 + m_p}}.$$
 (2.1.14)

2.2 Mikroskop sił atomowych

Mikroskop sił atomowych (AFM) pozwala na precyzyjne badanie powierzchni próbki. Ostrze mikroskopu jest przymocowane do sprężyny – dźwigni, której odchylenie pozwala wyznaczyć wartość siły oddziaływania międzyatomowego pomiędzy atomami ostrza i badanej powierzchni. Rozkład sił na całej powierzchni próbki jest gromadzony i przetwarzany komputerowo na obraz. Pomiar ugięcia dźwigni jest dokonywany metodami optycznymi z wykorzystaniem laserowego źródła światła. Do obrazowania powierzchni próbki o własnościach magnetycznych stosuje się ostrze pokryte materiałem magnetycznym. Za pomocą mikroskopu sił atomowych dokonuje się również pomiarów sił tarcia w skali atomowej i obrazuje się je – mierzymy wówczas także skręcenie dźwigni w kierunkach nie prostopadłych do badanej powierzchni. Tak pracujący mikroskop nosi nazwę mikroskopu sił tarcia – FFM (ang. *Friction force microscope*).

Interpretacja obrazów otrzymywanych za pomocą AFM wymaga szczegółowej analizy oddziaływań ostrze–próbka. Na ten temat powstało wiele prac teoretycznych [61, 62]. W idealnej sytuacji zakładamy, że obserwowany obraz jest wynikiem oddziaływania jedynie kilku – najbliższych sobie – atomów ostrza i próbki, zatem obrazy tej samej powierzchni otrzymane dla różnych ostrzy mogą różnić się między sobą.

3. TEMATYKA DOŚWIADCZENIA I APARATURA POMIAROWA

3.1 Zasada działania mikroskopu

W mikroskopie sił atomowych do zobrazowania powierzchni próbki możemy wykorzystać siły krótko- lub długozasięgowe, czego konsekwencją są dwa podstawowe tryby pracy mikroskopu:

- kontaktowy sposób obrazowania (*Contact Mode*) ostrze AFM przesuwa się po powierzchni badając topografię rozkładu atomów. Nacisk ostrza na powierzchnię jest rzędu (10⁻⁷ 10⁻¹¹) N. W tym trybie wykorzystujemy krótkozasięgowe siły oddziaływania międzyatomowego. Pomiar jest wówczas stosunkowo szybki, ale ostrze może zmienić topografię badanej próbki.
- bezkontaktowy sposób obrazowania (*Tapping Mode*) odsuwając ostrze na odległość (10 – 100) nm wykorzystujemy do obrazowania siły długozasięgowe. W tej metodzie nie mierzymy statycznego ugięcia dźwigni, ale wprawiamy dźwignię w drgania o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości rezonansowej. W wyniku oddziaływania ostrza z atomami podłoża zmienia się amplituda i częstotliwość drgań dźwigni, a informacje o tych zmianach służą do uzyskania obrazu. Główną wadą tego trybu pracy jest stosunkowo długi czas obrazowania.

Typowe dźwignie AFM mają długość od 100 do 500 µm, stałe sprężystości od 0,01 do 1 N/m i częstotliwości rezonansowe w zakresie od 3 do 120 kHz.

Przeprowadzenie pomiaru z wykorzystaniem AFM zwykle nie wymaga skomplikowanych procedur przygotowania próbek i, w porównaniu z innymi metodami mikroskopowymi, może być dokonane zarówno w powietrzu, w cieczy, jak i w próżni. Metodą AFM bada się tzw. powierzchnie swobodne próbek, czyli powierzchnie naturalnie występujące albo powierzchnie otrzymane w wyniku bardzo precyzyjnego cięcia próbki. AFM stosuje się w chemii i fizyce do badania np. struktury krystalicznej próbek, do obserwacji formowania warstw lub osadzania cząstek. Metoda ta jest też często wykorzystywana w metalurgii, geologii i biofizyce.

3.2 Cele doświadczenia

Celem ćwiczenia jest pomiar charakterystyk makroskopowego modelu AFM (MAFM) analogicznych z charakterystykami rzeczywistego mikroskopu sił atomowych pracującego w trybie bezkontaktowym. Podczas pracy w tym trybie wykorzystywane jest zjawisko zmiany częstotliwości rezonansowej belki, na której umieszczone jest

ostrze sondujące, wraz ze zmianą siły działającej na tę belkę. Ponieważ wartość tej siły zależy od odległości ostrze - badana powierzchnia, możliwym jest obrazowanie topografii powierzchni. Do zamodelowania oddziaływania, atomy ostrza - atomy podłoża, zastosowano małe magnesy neodymowe. Studenci zdejmują charakterystykę rezonansową belki modelu dla częstotliwości podstawowej oraz wybranych wyższych częstotliwości drgań własnych. Kolejnym zadaniem jest określenie zależności siły odpychającej dwóch magnesów od odległości między ich powierzchniami. Do tego celu używany jest czujnik siły oraz konsola pomiarowa COACH, a także oprogramowanie wspomagające proces pomiarowy COACH 5. Następnie otrzymane wyniki wykorzystywane są do określenia zmian częstotliwości podstawowej oraz wybranych wyższych częstotliwości drgań własnych wraz z pojawieniem się siły oddziałującej na belkę modelu. W ostatnim etapie doświadczenia studenci wykorzystują model powierzchni ciała stałego, który stanowi stalowa płyta z rozmieszczonymi na niej magnesami neodymowymi, czujnik siły oraz układ sterujący do zobrazowania topografii zamodelowanej powierzchni. Zastosowanie konsoli pomiarowej umożliwiającej jednoczesne sterowanie i pomiar oraz wykorzystanie oprogramowania komputerowego pozwala na wierne odtworzenie topografii modelu powierzchni, analogicznie do rzeczywistego AFM.

4. ZESTAW POMIAROWY

4.1 Poszczególne elementy

Model mikroskopu sił atomowych wykonałem z płyt granitowych i umieściłem na wsporniku-podstawie mocowanym do ściany budynku pracowni. W ten sposób oddzieliłem mechanicznie ruchome części modelu, co znacząco zmniejszyło niepożądane drgania belki. Pozostałe elementy układu umieściłem na tradycyjnym stole doświadczalnym. Widok modelu przedstawia rys. 4.1.1. Ponadto w skład zestawu pomiarowego wchodzą następujące przyrządy pomiarowe, stanowiące wyposażenie II Pracowni Fizycznej IFD UWr.:

 zestaw komputerowy z systemem operacyjnym Windows 95 i konsolą pomiarowo-sterującą współpracującą z kartą przetwornika analogowo-cyfrowego IP COACH 4 UIA (wewnątrz komputera) oraz oprogramowaniem wspomagającym pomiary COACH 5;

- generator akustyczny połączony z przetwornikiem piezoelektrycznym (nr 3) znajdującym się na belce modelu;
- oscyloskop dwukanałowy połączony z generatorem akustycznym i przetwornikiem piezoelektrycznym (nr 4);
- miliwoltomierz połączony z przetwornikiem piezoelektrycznym (nr 4) i konsolą pomiarową;
- czujnik siły połączony z konsolą pomiarową;
- konsola sterującopomiarowa połączona z układem umożliwiającym, wspomagane komputerowo, przesuwanie modelu powierzchni w kierunkach x i y;

Schemat blokowy zestawu pomiarowego przestawiony jest na rys. 4.1.2.



Rys. 4.1.1 Rzeczywisty widok modelu mikroskopu sił atomowych, gdzie: 1 – podstawa granitowa, 2 – belka aluminiowa, 3 i 4 – przetworniki piezoelektryczne, 5 – model powierzchni ciała stałego, 6 – układ umożliwiający przesuwanie próbki, 7 – mocowanie, 8 – kostka przyłączeniowa.



Rys. 4.1.2. Schemat blokowy układu pomiarowego, gdzie MAFM – model mikroskopu sił atomowych

4.2 Charakterystyka zestawu

Najważniejszą część zestawu pomiarowego stanowi makroskopowy model mikroskopu sił atomowych, wykonany z dwóch płyt granitowych o grubości 55 i 70 mm. Grubsza płyta stanowi podstawę, na której pionowo umieszczona jest mniejsza płyta – patrz rys. 4.2.1. Na rysunku tym przedstawiono także orientacyjne rozmiary poszczególnych elementów modelu podane w mm.

Belka mikroskopu wykonana z pręta stalowego 0 średnicy r = 6 mm i długościz = 0,30 m przymocowana jest do prostokątnej płytki aluminiowej, którą przykręcono do elementu granitowego. Do belki, niewielkimi śrubami, przymocowane są dwa przetworniki piezoelektryczne wykorzystywane jako przetworniki akustyczne (średnica ceramiki piezoelektrycznej $c = (11,50 \pm$ 0.25) mm). Jeden. pracujący jako źródło drgań, umieszczony jest blisko zamocowanego końca belki, a drugi, umieszczony blisko swobodnego końca belki, służy jako detektor drgań belki. Pierwszy z nich jest podłączony do generatora akustycz-



Rys. 4.2.1 Przybliżone rozmiary (w mm) poszczególnych elementów modelu



Rys. 4.2.2. Model powierzchni (MoS), gdzie: 1 – podnośnik trapezowy, 2 – złącza do połączenia z interfejsem komputera, 3 – dwa silniki krokowe, 4 – płytka metalowy z magnesami.

nego i oscyloskopu a drugi do oscyloskopu i miliwoltomierza cyfrowego. Aby ograniczyć wpływ połączeń elektrycznych na dynamikę układu, w obu przypadkach do połączeń użyto miedzianego drutu o niewielkiej średnicy. Całość modelu umieszczono na czterech nóżkach gumowych. Tuż pod swobodnym końcem belki, wewnątrz otworu kołowego w płycie granitowej znajduje się model powierzchni ciała stałego (*MoS – model of surface*). MoS poruszany jest w płaszczyźnie poziomej dzięki dwóm silnikom krokowym połączonym poprzez interfejs COACH z komputerem. Ruchu modelu badanej powierzchni w górę i w dół dokonuje się dzięki zastosowaniu trapezowego, ręcznego podnośnika samochodowego. Rysunek 4.2.2 prezentuje MoS, podczas gdy rysunek 4.2.3 przedstawia metalową płytkę, na której umieszczono magnesy neodymowe. Strzałki wskazują kierunek skanowania podczas pomiarów.



Rys. 4.2.3 Przybliżone rozmiary (w mm) płyty metalowej z magnesami

4.3 Procedura pomiarowa

Opisany zestaw doświadczalny umożliwia pomiar charakterystyk modelu, które są analogiczne z charakterystykami rzeczywistego AFM oraz umożliwia badanie topografii modelu powierzchni ciała stałego. W procedurze pomiarowej można wyróżnić następujące etapy:

- badanie charakterystyki rezonansowej belki modelu mikroskopu dla częstotliwości podstawowej oraz wyższych częstotliwości drgań własnych;
- określenie zależności siły odpychającej pomiędzy dwoma magnesami neodymowymi od odległości pomiędzy ich powierzchniami. Do tego celu używany jest zestaw pomiarowy przedstawiony na rysunku 4.3.1;



Rys. 4.3.1 Zestaw pomiarowy do wyznaczania zależności siły z jaką odpychają się dwa magnesy neodymowe od odległości między ich powierzchniami, gdzie: 1 – czujnik siły, 2 – śruba mikrometryczna, 3 – magnesy.

- rejestracja charakterystyk rezonansowych belki mikroskopu w obecności siły przyłożonej do jej swobodnego końca;
- określenie punktu pracy tj. częstotliwości, z którą powinien pracować model by możliwe było określenie topografii modelu powierzchni ciała stałego;
- 5. zbadanie topografii modelu powierzchni ciała stałego.

5. WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI

Jak wynika z rozważań teoretycznych [58] przedstawionych w części 2.1 niniejszego rozdziału, częstotliwości drgań własnych pręta jednostronnie zamocowanego, o przekroju kołowym, nie są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej – wypadkowe drganie pręta jest nieperiodyczne. Tabela 5.1 przedstawia wartości częstotliwości drgań układu f_k wyliczone dla opisywanego zestawu doświadczalnego w oparciu o wzór (2.1.12).

Tab. 5.1. Obliczone oraz wyznaczone doświadczalnie wartości częstotliwości belki modelu, gdzie:

μ_k – liczba falowa; $n_k = \frac{\mu_k^2}{\mu_1^2}$; f_{k} , f_p , f_l – częstotliwości obliczone (wyjaśnienia w tekście);	f _m
 – częstotliwość zmierzona; 	$u(f_m)$ – jej niepewność standardowa eksperymentatora.	

k μ _k	n	f_k	f _p	f_l	f _m	<i>u</i> (<i>f_m</i>)	
	μ_k	TI _K	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	1,87	1,00	82	81	73	51	1
2	4,69	6,27	513	510	460	365	5
3	7,85	17,50	1433	1424	1285	1171	10
4	10,99	34,37	2815	2797	2523	2681	20
5	14,13	56,84	4655	4625	4172	3717	25
6	17,28	85,5	7002	6957	6276	6892	30
7	20,42	119	9745	9683	8735	8396	50

Wyniki obliczeń zapisane jako f_p zostały uzyskane po zastosowaniu wzoru (2.1.14), w którym uwzględniono dodatkową masę m_p przymocowaną do końca pręta, którą stanowią magnes, śruba i przewody – $m_p = (7,0 \pm 0,1)$ g. Dwie ostatnie kolumny to wartości częstotliwości drgań pręta zmierzone doświadczalnie f_m oraz ich niepewności standardowe eksperymentatora $u(f_m)$ [9]. Otrzymane w eksperymencie wartości częstotliwości f_m są zgodne z wartościami f_p obliczonymi ze wzoru 2.1.14 – rozbieżności wynoszą około 20% (poza pierwszą częstotliwością, dla której różnice są większe). Ponadto czę-
stotliwości rezonansowe są w zgodzie z relacją dyspersyjną (2.1.13), według której $f \propto n_k$. Zależność ta została przedstawiona na rysunku 5.1 i posłużyła do wyznaczenia wartości współczynnika nachylenia prostej najlepszego dopasowania, której użyto następnie do wyznaczenia częstotliwości zapisanych w tabeli 5.1 jako f_l . Częstotliwości te można traktować jako wygładzone wartości częstotliwości doświadczalnych.



Rys. 5.1. Zależność częstotliwości drgań belki modelu fm od nk



Rys. 5.2. Charakterystyki rezonansowe belki MAFM dla k = 2 (romby), 4 (kwadraty) i 7 (trójkąty)

Charakterystyki rezonansowe opisywanego układu pomiarowego dla k = 2, 4 i 7 zostały przedstawione na rys. 5.2. U/U_{max} jest ilorazem wartości napięcia U na przetworniku piezoelektrycznym zmierzonego dla określonej częstotliwości i maksymalnej wartości napięcia otrzymanej w pomiarze U_{max} , natomiast $[(f-f_0)/f_0] \cdot 100\%$ określa procentową zmianę częstotliwości w stosunku do częstotliwości f_0 , dla której zarejestrowano U_{max} . Wyraźnie widać, że ich szerokość połówkowa zwiększa się wraz ze wzrostem k. Zatem częstotliwość pracy modelu należy wybrać spośród pierwszych częstotliwości drgań własnych modelu. Autor, opierając się na wynikach pomiarów, jako najbardziej odpowiednią do modelowania pracy mikroskopu sił atomowych wybrał częstotliwość zbliżoną do drugiej częstotliwości drgań własnych układu, tj. $f_m = 365$ Hz.

Pierwszą czynnością prowadzącą do pomiarów umożliwiających odwzorowanie powierzchni modelu za pomocą MAFM jest określenie zależności siły, z jaką odpychają się dwa magnesy użyte do budowy modelu, od odległości między ich powierzchniami. Wyniki pomiarów przeprowadzonych z zastosowaniem zestawu pomiarowego opisanego powyżej (rys. 4.3.1) przedstawia rys. 5.3. Zmianę częstotliwości rezonansowej belki MAFM wywołaną obecnością magnesu, umieszczonego w pewnej odległości pod magnesem przymocowanym do swobodnego końca belki, przedstawia rysunek 5.4. Obserwujemy wyraźne zwiększenie częstotliwości rezonansowej ze wzrostem siły odpychania między magnesami (siła $F_{d1} = 0,14$ N odpowiada odległości $d_1 = 8$ mm, a siła F_{d2} = 0,38 N odległości $d_2 = 5$ mm).



Rys. 5.3. Zależność siły odpychania F, od odległości d między powierzchniami magnesów



Rys. 5.4. Przesunięcie częstotliwości rezonansowej $f_m = 365$ Hz belki MAFM wywołane działaniem na jej swobodny koniec siły ($\Delta - F_{d1}=0,14$ N; $\circ - F_{d2}=0,38$ N).

Wizualizacja topografii modelu powierzchni została przeprowadzona dla częstotliwości generatora akustycznego f = 371 Hz i początkowej odległości pomiędzy magnesem belki i magnesem powierzchni d = 4 mm. Wyniki, w postaci odwzorowania powierzchni, przedstawione są na rysunku 5.5. Odwzorowanie jest bardzo wierne i oddaje rzeczywisty wygląd modelu powierzchni.



Zgodnie ze stanem wiedzy autora jest to pierwsza w literaturze tego rodzaju wizualizacja wykorzystująca model AFM i dokonana w pełni automatycznie, z zastosowaniem komputera.

Wszystkie wyniki eksperymentalne ilustrują pracę modelu AFM – narzędzia pozwalającego przybliżyć zasadę działania rzeczywistego mikroskopu AFM. Wyniki te są analizowane i prezentowane przez studentów w postaci sprawozdania z wykonania ćwiczenia.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiony powyżej makroskopowy model mikroskopu sił atomowych umożliwia badanie charakterystyk analogicznych z charakterystykami rzeczywistego mikroskopu sił atomowych pracującego w trybie bezkontaktowym – częstotliwości rezonansowej belki, odległości pomiędzy belką i badaną powierzchnią, zmian częstotliwości drgań własnych belki.

Otrzymywane wyniki eksperymentalne, w granicach niepewności pomiarowych, pozostają w zgodzie z teoretyczną relacją dyspersyjną (2.1.13). Różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi a wartościami otrzymanymi z pomiarów są tego samego rzędu co w pracy [58]. Głównym powodem tych różnic jest niedostateczne połączenie mechaniczne poszczególnych elementów zestawu oraz niepożądane drgania całego układu. Należy zaznaczyć, że system charakteryzuje znacznie więcej, niż zostało to zaprezentowane w niniejszej pracy, częstotliwości rezonansowych. Są one konsekwencją innych, nieuwzględnionych w rozważaniach teoretycznych, rodzajów drgań systemu.

Zastosowanie komercyjnego interfejsu sterującego oraz oprogramowania kontrolnopomiarowego COACH 5 pozwoliło zautomatyzować proces pomiarowy. Rezultaty obrazowania modelowanej powierzchni ciała stałego z zastosowaniem modelu mikroskopu sił atomowych, przedstawione na rysunku 5.5, pozwalają stwierdzić, że odtworzenie jej topografii jest wierne.

Opisany układ pomiarowy może ponadto zostać użyty do badania między innymi wartości współczynnika sprężystości belki modelu lub określenia jej efektywnej masy, a także do weryfikacji równań opisujących zachowania tak złożonego układu.

Autor uważa, że prezentowany model mikroskopu sił atomowych wraz z układem sterująco-pomiarowym jest użytecznym narzędziem w zaawansowanej pracowni fizycznej. Jego wykorzystanie pozwala doskonalić umiejętności eksperymentatorskie niezbędne w pracy doświadczalnej.

VII. WNIOSKI KOŃCOWE

Realizacja celów pracy zaowocowała zaplanowaniem i budową czterech studenckich stanowisk pomiarowych w II PF IFD UWr., z których pierwsze zatytułowanie *Promie-niowanie rentgenowskie* zostało oddane do użytku w roku akademickim 2003/2004, kolejne – *Emisja polowa* – zostało włączone do zajęć ze studentami w roku akademic-kim 2004/2005, a dwa pozostałe planuje się w pełni uruchomić w bieżącym roku.

Ponadto autor przygotował wszystkie niezbędne materiały opisujące nowe stanowiska doświadczalne oraz opracował propozycje obliczania niepewności pomiarowych wyników doświadczeń zgodnie z nowymi, międzynarodowymi normami. Materiały te nadają się do bezpośredniego wykorzystania podczas zajęć ze studentami i zostały zamieszczone w załączniku do niniejszej pracy.

Zaprezentowane ćwiczenia umożliwiają kształtowanie między innymi umiejętność:

- dokonywania pomiarów wideo;
- obsługi oprogramowania do rejestrowania obrazu wideo i oprogramowania służącego do jego obróbki;
- dokonywania pomiarów z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego;
- obsługi oprogramowania automatyzującego proces pomiarowy i gromadzenie danych;
- dokonywania pomiarów zmiany pracy wyjścia metodą prostych Fowlera-Nordheima;
- rejestracji cyfrowych obrazów emisyjnych;
- krytycznej analizy wyników pomiarów.

Autor ma świadomość, że prezentowany materiał stanowi jedynie początek długotrwałego i kosztownego procesu modernizacji zaplecza dydaktycznego zaawansowanej pracowni fizycznej. Celowym wydaje się wzbogacenie II PF o rzeczywisty mikroskop sił atomowych, a także o mikroskop elektronowy i nowej generacji polaryzacyjny mikroskop optyczny. W ten sposób w II Pracowni Fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego powstałby szereg stanowisk doświadczalnych kompleksowo prezentujących różnorodne techniki mikroskopowe.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych na poszczególnych stanowiskach oraz opisy doświadczeń zostały przedstawione w dziewięciu publikacjach, zarówno w czasopiśmie

polskim *Aparatura badawcza i dydaktyczna*, jak i czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym *European Journal of Physics*. Ponadto autor prezentował poszczególne zestawy doświadczalne podczas spotkań konferencyjnych. Kompletną listę publikacji przedstawiono w kolejnym rozdziale. Rozdział zawiera spis publikacji, w których zawarte są opisy doświadczeń i wyniki pomiarów składające się na niniejszą rozprawę doktorską. Publikacje prezentowane są w kolejności chronologicznej i znajdują się, w wersji elektronicznej, na dołączonej do rozprawy płycie CD.

- [i] T. Greczyło, E. Dębowska, *Brownian motion with Data Video*, Proceedings of MPTL-9, (Multimedia in Physics Teaching and Learning), http://physik.unigraz.at/MPTL9/, (2004)
- [ii] T. Greczyło, E. Dębowska, Aparat rentgenowski w zaawansowanej pracowni fizycznej, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom IX, nr 2 (2004), 118-125
- [iii] T. Greczyło, E. Dębowska, Finding viscosity of liquids from Brownian motion at students' laboratory, Eur. J. Phys. 26 (2005) 827-833
- [iv] T. Greczyło, E. Dębowska, Ruchy Browna z kamerą wideo, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom X, nr 3 (2005), 172-177
- [v] T. Greczyło, E. Dębowska, Macroscopic Model of Atomic Force Microscope, Proceedings of MPTL-10, (Multimedia in Physics Teaching and Learning), http://pen.physik.uni-kl.de/w_jodl/MPTL/MPTL10/Proceedings.html, (2005)
- [vi] T. Greczyło, P. Mazur, E. Dębowska, *Mikroskop polowy w zaawansowanej pracowni fizycznej*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom X, nr 4 (2005), 290-295
- [vii] T. Greczyło, P. Mazur, E. Dębowska, Field emission microscope at advanced student's laboratory, Eur. J. Phys. 27 (2006) 265-272
- [viii] T. Greczyło, E. Dębowska, The macroscopic model of an atomic force microscope at students' laboratory, Eur. J. Phys. 27 (2006) 501-513
- [ix] T. Greczyło, E. Dębowska, *Makroskopowy model mikroskopu sił atomowych*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna *praca w przygotowaniu*

IX. ZAŁĄCZNIKI

A. Ruchy Browna – Instrukcja do ćwiczenia

1. Zagadnienia teoretyczne

Ruchy Browna, równanie Einsteina-Smoluchowskiego, liczba Avogadra i metody wyznaczania jej wartości, mikroskop optyczny – budowa i zasada działania.

2. Literatura

- 1. A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski, *Wstęp do fizyki*, tom I, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1976,
- 2. Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz. IV, Optyka, PWN, Warszawa 1954
- 3. B.M. Jaworski, A.A. Piński, Elementy fizyki, tom 1, PWN, Warszawa 1977
- T. Greczyło, E. Dębowska, *Ruchy Browna z kamerą wideo*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom X, nr 3, 2005
- R. Salmon, C. Robbins, K. Forinash, Brownian motion using video capture, Eur. J. Phys. 23 (2002), 249-253,
- 6. T. Greczyło, E. Dębowska, *Finding viscosity of liquids from Brownian motion at students' laboratory*, Eur. J. Phys. **26** (2005), 827-833,
- 7. Przewodnik po COACH 5, fragmenty.

3. Cel ćwiczenia

Ćwiczenie umożliwia realizację dwóch zadań doświadczalnych:

- a. Wyznaczanie liczby Avogadra w oparciu o badanie ruchu drobin w kształcie kul o znanej średnicy, znajdujących się w cieczy o znanej temperaturze i lepkości.
- b. Wyznaczanie lepkości cieczy w oparciu o badanie ruchu drobin w kształcie kul o znanej średnicy, znajdujących się w badanej cieczy w określonej temperaturze.

Prowadzący zajęcia na pracowni decyduje, którą wersję doświadczenia, dla jakiej cieczy i ilu drobin wykonuje student.

4. Zestaw doświadczalny

Zestaw doświadczalny składa się z:

- mikroskopu optycznego BAD Carlzeiss Jena ze stołem pomiarowym umożliwiającym rejestrowanie powiększonego obrazu,
- analogowej, przemysłowej kamery wideo Unitra Polkolor TP-K16 rejestrującej obraz czarno-biały,
- zestawu komputerowego z systemem operacyjnym oraz oprogramowaniem edukacyjnym Coach 5, w skład którego wchodzi oprogramowanie do pomiarów wideo;
- karty wideo miroVIDEO DC 10 (wewnątrz komputera) wraz z oprogramowaniem do przechwytywania i zapisywania filmów w formacie cyfrowym – VidCap oraz oprogramowaniem do edycji plików wideo VideoEdytor,
- szkiełka mikroskopowego (laboratoryjnego) podstawy z drutem o znanej średnicy oraz szkiełka nakrywkowego,
- pojemników z wodnymi roztworami gliceryny o znanym stężeniu (lepkości patrz tabela poniżej) i lateksowymi drobinami w kształcie kul o znanej średnicy.

5. Część doświadczalna

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy zapoznać się ze znajdującymi się w dodatku do ćwiczenia opisami *Przewodnik po Coach 5, Przechwytywanie filmów* wideo, Obróbka przechwyconego filmu wideo do formatu .avi dla pomiarów wideo w programie Coach 5 oraz Pomiary wideo w programie Coach 5.

- a. Wyznaczanie liczby Avogadra w oparciu o badanie ruchu drobin w kształcie kul o znanej średnicy, znajdujących się w cieczy o znanej temperaturze i lepkości
- przygotować szkiełko laboratoryjne podstawę oraz szkiełko nakrywkowe do pomiaru, tzn. umyć pod bieżącą ciepłą wodą, osuszyć delikatnie ściereczką i przemyć alkoholem (czynności wykonać ostrożnie by nie uszkodzić drutu służącego do skalowania filmu);
- umieścić szkiełko laboratoryjne podstawę na stoliku mikroskopu i wprowadzić nań kroplę badanego roztworu; przed użyciem wodny roztwór gliceryny z kulami lateksowymi dokładnie wymieszać;
- przykryć roztwór szkiełkiem nakrywkowym;

- na szkiełko nakrywkowe nanieść kroplę roztworu immersyjnego, zbliżyć obiektyw (*x100*) i ustawić w okularze ostry, kontrastowy obraz (przykładowe obrazy znajdują się w dodatku);
- rejestrowanie filmu rozpocząć po około minucie od przygotowania próbki (przykrycia cieczy szkłem nakrywkowym) – w tym czasie ustalają się warunki równowagi (drobiny powinny poruszać się ruchem chaotycznym bez wyraźnego, stosunkowo szybkiego przemieszczania się w jednym kierunku);
- włączyć komputer i wykorzystując kartę miro DC10 oraz oprogramowanie Vid-Cap zarejestrować (przechwycić) film przedstawiający ruch drobin – szczegóły postępowania w części A1 *Przechwytywanie filmów wideo*;
- zmienić format zarejestrowanego filmu w programie VideoEdytor szczegóły postępowania w części A2 Obróbka przechwyconego filmu wideo do formatu .avi dla pomiarów wideo w programie COACH 5;
- przeprowadzić pomiary wideo na zarejestrowanym filmie z wykorzystaniem oprogramowania COACH 5 przed przystąpieniem do pomiarów należy zapo-znać się z oprogramowaniem do pomiarów wideo opisanym w *Przewodniku po COACH 5* oraz wykonać ćwiczenie wstępne *Startujący sprinter* w projekcie Wideopomiary wstęp znajdującym w programie COACH 5;
- pomiary wideo powtórzyć dla 5-10 różnych drobin a otrzymane wyniki wykorzystać do wyznaczenia liczby Avogadra.

b. Wyznaczanie lepkości cieczy w oparciu o badanie ruchu drobin w kształcie kul o znanej średnicy, znajdujących się w badanej cieczy w określonej temperaturze

- wykonać czynności jak w ppkt. a;
- pomiary wideo powtórzyć dla 5-10 różnych drobin a otrzymane wyniki wykorzystać do wyznaczenia lepkości użytego wodnego roztworu gliceryny.

6. Niepewności pomiarowe

Przed przystąpieniem do opracowania niepewności pomiarowych zapoznać się z instrukcją Ocena niepewności pomiarowych w II Pracowni Fizycznej.

Podczas wykreślania zależności $\langle r^2 \rangle = f(t)$ na wykresach nanieść niepewności poszczególnych wielkości wynikające z uwzględnienia niepewności wzorcowania i niepewności eksperymentatora dla wartości przemieszczenia i czasu oraz prawa przenoszenia niepewności standardowych. Następnie wykorzystać metodę regresji liniowej (metoda najmniejszych kwadratów) do wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej najlepszego dopasowania dla wyników eksperymentalnych oraz jego niepewności standardowej. Ostatecznie do wyznaczenia niepewności szukanej wielkości wykorzystać prawo przenoszenia niepewności standardowej.

7. Dodatek

a. Przykładowy obraz rejestrowany przez kamerę



b. Tabela wartości współczynnika lepkości wodnego roztworu gliceryny za Ch.D.
 Hadgman, *Handbook of Chemistry and Physics*, 40th edition, Chemical Rubber
 Publishing Co., Cleveland, Ohio 1959

gęstość	objętościowe stę-	współczynnik lepkości roztworu [Pa·s]				
[g/cm ³]	żenie gliceryny [%]	20 °C	25 °C	30 °C		
1,000	0	1,005	0,893	0,800		
1,036	15	1,517	1,331	1,174		
1,061	25	2,095	1,810	1,590		
1,074	30	2,501	2,157	1,876		

- c. Średnica kul lateksowych użytych do przygotowania wodnych roztworów gliceryny $2a = (850\pm50)$ nm
- d. Średnica drutu na szkiełku laboratoryjnym $d = (40\pm5) \,\mu\text{m}$

A1. Ruchy Browna – Przechwytywanie filmów wideo

Przechwytywanie przez komputer filmów wideo z kamery analogowej **TP-K16** odbywa się z wykorzystaniem karty wideo **miro DC10** oraz oprogramowania **VidCap**.

 W celu uruchomienia programu wciśnij ikonę pulpicie.

VidCap

znajdującą się na

2. Po tej czynności na ekranie pojawi się okno prezentujące aktualny widok z kamery.



- Dokonaj regulacji ostrości i jasności obrazu tak, by otrzymać najlepszą jakość obrazu.
- 4. Określ lokalizację i nazwę pliku wideo, który zamierzasz przechwycić. W tym celu naciśnij przycisk w programie zaznaczony na poniższym rysunku.

🚔 VidCap - C:\Filmy\capture.avi							
<u>F</u> ile <u>E</u> dit	<u>O</u> ptions <u>C</u> apture <u>H</u> elp						
<u>i di ki</u>	95 P 2 60						

5. Następnie w oknie przedstawionym poniżej znajdź katalog docelowy pliku (w przykładzie jest nim **C:/Filmy**/) i nazwij go swoim nazwiskiem.

Set Capture	File		? ×
<u>S</u> zukaj w:	🔄 Filmy	- 🗈 e	* 📰
9월 15_a 9월 15_b 9월 15_b_p 9월 25_p 9월 capture			
<u>N</u> azwa pliku:	C:\Filmy\Twoje_nazwisko		<u>O</u> twórz
<u>P</u> liki typu:	Microsoft AVI	•	Anuluj

 Po dokonaniu tych czynności rozpocznij procedurę przechwytywania obrazu naciskając przycisk przechwytywania filmu.

🚔 VidCap - C:\Filmy\capture.avi							
<u>F</u> ile <u>E</u> dit	Options Capture Help						
ð þ	FID DDD						

 Na ekranie pojawi się okno pozwalające określić szybkość przechwytywanego filmu oraz czas jego trwania. Należy wybrać, jak w przykładzie, szybkość 5 klatek/sekundę oraz czas 30 sekund.

Capture Video Sequence	×
Frame rate: 5.000	OK
Enable capture time limit	Cancel
Seconds: 30	<u>A</u> udio
Capture audio	<u>V</u> ideo
<u>D</u> irectly to disk C Capture to memory	Compress
☐ MCI control of source video	MC <u>I</u>

8. Następnie potwierdź rozpoczęcie przechwytywania naciskając przycisk OK.



 Proces przechwytywania trwa 30 sekund, a jego postęp można śledzić obserwując okno programu w najniższym pasku. Prawidłowo zakończony proces zostanie potwierdzony informacją widoczną na poniższym przykładzie.



UWAGA!

Zdarza się sporadycznie, że karta nie pracuje poprawnie, co objawia się trudnościami w prawidłowym przechwytywaniu obrazu – pojawiają się ramki opuszczone lub nie można zainicjować procesu przechwytywania, lub też brak jest sygnału z kamery (okno jest czarne). W takim przypadku należy wyłączyć komputer na moment i uruchomić go ponownie.

A2. Ruchy Browna – Obróbka przechwyconego filmu wideo do formatu .avi dla pomiarów wideo w programie COACH 5

Przeprowadzenie pomiarów wideo z oprogramowaniem **COACH 5** jest możliwe jedynie dla filmów cyfrowych z rozszerzeniem **.avi**. Niestety film rejestrowany przez kartę wideo miro **DC10** nie jest w formacie zgodnym z programem **COACH 5** i niezbędna jest jego obróbka, polegająca jedynie na zmianie formatu. W tym celu używane jest oprogramowanie VideoEdytor.

 W celu uruchomienia programu wciśnij ikonę pulpicie.



znajdującą się na

 Po tej czynności na ekranie pojawi się okno programu, którego fragment prezentuje poniższy rysunek.



 Zarejestrowany z użyciem karty miro DC10 film cyfrowy należy otworzyć w programie VideoEdytor. W tym celu naciśnij klawisz zaznaczony na powyższym rysunku.

Insert Video I	File			? ×
<u>S</u> zukaj w:	🔄 Filmy		- 🗈 🖸	
ୟୁଲି 15_a ୟୁଲି 15_b ସୁଲି 15_b_p ସୁଲି 2 <u>5_p</u> ୟୁଲି Twoje_naz	wisko			
<u>N</u> azwa pliku:	capture			<u>O</u> twórz
<u>P</u> liki typu:	All formats		•	Anuluj
Subject:				<u>I</u> nfo
Des <u>c</u> ription:				<u>B</u> rowse
		r T		<u>H</u> elp
🗖 Auto Play	<mark>∏ M</mark> ute	•	Preview	

- 4. Zlokalizuj plik wideo, który chcesz poddać obróbce i zaakceptuj wybór.
- Umieść plik w najwyższym oknie programu nazwanym Va. Zadbaj, przesuwając film myszą, by znajdował się on maksymalnie na lewo w oknie – patrz rysunek poniżej.

🖉 Me	diaStu	dio Video Ec	litor - untitled		
<u>File</u>	idit ⊻i	iew <u>I</u> nsert <u>C</u>	lip <u>H</u> elp	and the second	
	30) 👗 🖻 📑		d C) B =	
III	2	1 📲 –	- FX EX)	Lint	XX
		0:00:00:07	0:00:01:00	0:00:02:00	0:00:03:00
X Q	Va		00.0		1.00
	Fx				

6. Wyeksportuj z programu **VideoEdytor** film wideo w formacie cyfrowym. W tym celu wybierz w zakładce **File** opcję **Create** a następnie **Video File**.



7. W wyniku wykonania tych czynności na ekranie pojawi się okno przedstawione poniżej.

Create Video File				? ×
Zapisz w: ∫ 🔂 Filmy	•] 🗈	e ř	8-8- 0-0- 0-0-
' 범과 15_a 15_b 15_b 15_p 13 25_p 14과 Twoje_nazwisko				
Nazwa pliku: Twoje_inicjały				Zapi <u>s</u> z
· Zapisz jako <u>t</u> yp: Microsoft AVI files (*.avi)		•		Anuluj
Subject:			0	Options
Des <u>c</u> ription:				Browse
:	×		Ē	<u>H</u> elp
C Entire Project C Preview Area				S <u>e</u> lect
Save to Album		~		Album

- Wpisz nazwę pliku zadbaj by była ona krótka (nie więcej niż 6 znaków), np. Twoje inicjały. Następnie naciśnij klawisz **Options** zaznaczony na powyższym rysunku. W ten sposób rozpoczniesz procedurę określania formatu nowego filmu wideo.
- W oknie, którego widok znajduje się poniżej wybierz zakładkę General i określ szybkość filmu na 5 klatek na sekundę. Nie akceptuj.

Video Save Options
<u><u><u>6</u>eneral</u> <u>Compression</u> <u>Advance</u> <u>Cropping</u></u>
Data Irack: Video Only
Erame Rate: 5 Frames/Sec
Frame Size
C <u>S</u> tandard 320 x 240 ▼
Height: 480
<u>K</u> eep Aspect Ratio
☐ Field- <u>b</u> ased

 Następnie wybierz zakładkę Compression i określ Compression jako Codec Cinepak firmy Radius, Quality – 100, Key Frame – 15 oraz Data type – 24 Bits Compressed RGB. Zaakceptuj wybór naciskając OK i rozpocznij eksportowanie filmu naciskając klawisz Zapisz.

ideo Save Options		
<u>G</u> eneral <u>Compression</u>	Advance	Cropping
Co <u>m</u> pression:		
Codec Cinepak firmy Radius 🗾	A <u>b</u> out	
Quality: 🚺 📄 🚺	Configure	
Key Frame for Every 🛛 15 📑 Frames		
Data <u>T</u> ype: 24 Bits Compressed RGE	·	
Audio Format: Attributes:		
OK Car	ncel <u>H</u> elp	1

11. Proces obróbki filmu trwa kilka minut, a jego postęp jest widoczny w oknie programu. Po zakończeniu procedury eksportowania zamknij program bez zapisu dokonanych zmian.

B. Promieniowanie rentgenowskie – Instrukcja do ćwiczenia

1. Zagadnienia teoretyczne

Promieniowanie rentgenowskie, poziomy energetyczne w atomie, stała Plancka i metody wyznaczania jej wartości, struktura krystalograficzna, dyfrakcyjne metody badania kryształów

2. Literatura

- 1. Ch. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999,
- 2. H. Ibach, H.Lüth, *Fizyka ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996,
- 3. Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, tom 5, PWN, Warszawa 1973
- 4. L. Kalinowski, Fizyka metali, PWN, Warszawa 1973
- 5. T. Greczyło, E. Dębowska, *Aparat rentgenowski w zaawansowanej pracowni fizycznej*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom IX, nr 2 (2004), 118-125
- 6. K. Hermbecker, Handbook Physics *X-Ray Experiments*, Desktop-Publishing, Duderstadt, PHYWE Series of Publication.

3. Cel ćwiczenia

Ćwiczenie umożliwia wykonanie następujących zadań doświadczalnych:

- a. Wyznaczenie stałej Plancka z krótkofalowej granicy promieniowania rentgenowskiego z wykorzystaniem monokryształu NaCl lub LiF. Prowadzący decyduje, którego z nich użyje student w ćwiczeniu.
- b. Określenie parametru sieci wybranych monokryształów (NaCl (100), LiF (100), KBr (100), KCl (100)) w oparciu o widmo wzorcowe jednego z nich. Prowadzący decyduje, który z kryształów przyjmie student jako wzorzec.

4. Zestaw doświadczalny

Zestaw doświadczalny składa się z:

- lampy rentgenowskiej z katodą Cu,
- licznika G-M,
- goniometru, na którym mocowany jest licznik oraz badana próbka,

- obudowy, w której znajdują się wyżej wymienione elementy oraz ich moduły zasilające,
- komputera wraz z oprogramowaniem umożliwiającym sterowanie urządzeniem oraz gromadzenie danych.

5. Część doświadczalna

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy zapoznać się ze skróconym opisem aparatu rentgenowskiego *Phywe X-ray unit* oraz oprogramowania *Measure*.

a. Wyznaczanie stałej Plancka z krótkofalowej granicy promieniowania rentgenowskiego z wykorzystaniem kryształu NaCl lub LiF

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- zamontować diafragmę z otworem kołowym o średnicy 1 mm dla próbki NaCl (2 mm dla LiF);
- ustawić goniometr w pozycji 6;
- zamontować próbkę wskazaną przez prowadzącego (LiF lub NaCl) próbki montujemy w osi goniometru, kryształem ku górze; ustawić synchroniczne obracania próbki i licznika w proporcji kątowej 2:1;
- zarejestrować serię dyfraktogramów, tzn. zależności liczby zliczeń licznika G-M od kąta ugięcia wiązki promieniowania rentgenowskiego dla następujących ustawień lampy rentgenowskiej: natężenie prądu 1 mA, napięcie kolejno od 15 kV do 35 kV co 2 kV, kąt padania wiązki promieniowania rentgenowskiego na próbkę od 3° do 15° z krokiem 0,1° dla NaCl (od 3° do 21° z krokiem 0,1° dla LiF);
- dla każdego dyfraktogramu wyznaczyć granicę krótkofalową promieniowania rentgenowskiego;
- wyznaczyć stałą Plancka.

b. Określanie stałych sieci wybranych monokryształów (NaCl (100), LiF (100), KBr (100), KCl (100)) w oparciu o widmo wzorcowe jednego z nich

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- zamontować diafragmę z otworem kołowym o średnicy 2 mm;
- ustawić goniometr w pozycji 5;
- zamontować próbkę wzorcową wskazaną przez prowadzącego;

- ustawić synchroniczne obracania próbki i licznika w proporcji kątowej 2:1;
- ustawić maksymalne wartości natężenia prądu oraz napięcia anodowego lampy rentgenowskiej (1 mA i 35 kV);
- zarejestrować dyfraktogram próbki wzorcowej, tzn. zależność liczby zliczeń licznika G-M od kąta padania wiązki promieniowania rentgenowskiego na monokryształ wzorcowy dla kąta w zakresie od 3° do 55° z krokiem 0,2°;
- na podstawie położenia pików K_α i K_β ustalić stałą (parametr) sieci i zidentyfikować próbki;
- powtórzyć rejestrację dyfraktogramów dla wybranych kryształów z parametrami z tabeli 1; ustawienia lampy rentgenowskiej jak wyżej (1 mA i 35 kV)
- wyniki doświadczenia wartości parametru sieci dla badanych monokryształów porównać z wartościami tablicowymi.

Kryształ	Zakres kątów	Krok	Średnica otworu diafragmy	Położenie goniometru
	[°]	[°]	[mm]	C
NaCl (100)	4 - 56	0,1	1	6
LiF (100)	4 - 51	0,1	2	5
KBr (100)	6 – 71	0,1	1	2
KCl (100)	5 - 60	0,1	2	6

6. Niepewności pomiarowe

Przed przystąpieniem do opracowania niepewności pomiarowych zapoznać się z instrukcją Ocena niepewności pomiarowych w II Pracowni Fizycznej.

Podczas wykreślania zależności $\sin \theta = f\left(\frac{1}{U}\right)$ na wykresach nanieść niepewności standardowe poszczególnych wielkości wynikające z uwzględnienia niepewności wzorcowania i niepewności eksperymentatora dla wartości kąta i napięcia oraz prawa przenoszenia niepewności standardowych. Następnie wykorzystać metodę regresji liniowej (metoda najmniejszych kwadratów) do wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej najlepszego dopasowania dla wyników eksperymentalnych oraz jego niepewności standardowej. Ostatecznie do wyznaczenia niepewności stałej Plancka wykorzystać prawo przenoszenia niepewności standardowych.

Wartość odległości między płaszczyznami dla badanego kryształu wyznaczyć jako średnią ważoną wyników otrzymanych dla poszczególnych rzędów dyfrakcji. Obliczyć jej niepewność standardową.

7. Dodatek

a. Poziomy energetyczne dla Cu (Z=29)



b. Poziomy energetyczne dla różnych materiałów anody lampy rentgenowskiej

	Eκ	E _{L1}	E _{L2}	E _{L3}	E _{M1}	E _{M2/3}	E _{M2}	E _{M3}
	[eV]	[eV]	[eV]	[eV]	[eV]	[eV]	[eV]	[eV]
Fe (Z = 26)	7112,0	846,1	721,1	708,1	92,9	54,0	-	-
Cu (Z = 29)	8978,9	1096,1	951,0	931,4	119,8	73,6	-	-
Mo (Z = 42)	19999,5	2865,5	2625,1	2520,2	504,6	-	409,7	392,3

 c. Energie i długości fal linii charakterystycznego dla różnych materiałów anody lampy rentgenowskiej

	E _{Kα1}	Ε _{Κα2}	Εκβ	λ _{Kα1}	λ _{Kα2}	λ _{κβ}
	[eV]	[eV]	[eV]	[pm]	[pm]	[pm]
Fe (Z = 26)	6404	6391	7058	194,00	193,60	175,66
Cu (Z = 29)	8048	8028	8905	154,05	154,44	139,23
Mo (Z = 42)	17479	17374	19599	70,93	71,36	63,26

knyoztok	typ sieci	d [100]	d [110]	d [111]	
KI YSZLOI		[pm]	[pm]	[pm]	
LiF	fcc	402,8	297,6	243,0	
KBr	fcc	658,0	465,3	379,9	
NaCl	fcc	564,1	398,8	325,6	
KCI	fcc	629,3	444,1	362,6	
Си	fcc	361,5	255,6	208,7	
AI.	fcc	404,1	285,7	233,3	
Ta	bcc	329,1	232,7	190,0	
Мо	bcc	314,0	222,0	181,3	
Ge	diamentu	565,8	400,1	326,7	
Si	diamentu	543,1	384,0	313,6	

Typy sieci krystalograficznych i odległości między płaszczyznami w wybranych kryształów

B1. Promieniowanie rentgenowskie – Skrócony opis aparatu PHYWE X-RAY UNIT oraz oprogramowania MEASURE

1. Informacje ogólne

Aparat rentgenowski spełnia normy bezpieczeństwa UE stawiane sprzętowi rentgenowskiemu przeznaczonemu do stosowania w pracowniach studenckich. W czasie pracy aparatu dawka promieniowania w odległości 0,1 m od przyrządu nie przekracza wartości 1 μ Sv/h. Jest to wartość zbliżona do dawki promieniowania naturalnego.

Konieczne jest jednak zastosowanie szczególnych środków ostrożności podczas korzystania z aparatu:

- przed przystąpieniem do pomiarów należy zapoznać się z instrukcją obsługi przyrządu oraz oprogramowania pomiarowego;
- aparat może być obsługiwany jedynie przez prowadzącego zajęcia, obsługę techniczną lub studenta;
- podczas pracy należy wykonywać wyłącznie czynności przewidziane procedurą pomiarową.

Zabrania się korzystania z przyrządu, gdy:

- przesuwana płyta szklana jest otwarta;
- przesuwana płyta szklana, szyba umożliwiająca obserwację lampy rentgenowskiej lub ekran fluoroscencyjny są uszkodzone (pęknięte lub poważnie zarysowane);
- wentylator lampy rentgenowskiej nie pracuje (nie słychać go).

2. Poszczególne elementy aparatu rentgenowskiego

2.1. Aparat rentgenowski Phywe X-ray unit

Rysunek 1 przedstawia aparat rentgenowski wraz z goniometrem i licznikiem G-M:

- 1. komora eksperymentalna,
- 2. panel sterowania ręcznego,
- 3. okno do obserwacji lampy rentgenowskiej,
- 4. wyświetlacze cyfrowe,
- 5. lampa rentgenowska z anodą wykonaną z Cu,
- 6. ekran fluoroscencyjny,
- 7. szuflada na dodatkowe wyposażenie,

 czerwony przycisk blokady przesuwu płyty wykonanej ze szkła akrylowego zawierającego ołów; aby zwolnić blokadę należy wcisnąć ten przycisk i obrócić go w prawo do wyczuwalnego oporu,

Główny wyłącznik aparatu oraz gniazdo przewodu zasilającego znajdują się z tyłu przyrządu.

2.2 Komora eksperymentalna

Rysunek 2 przedstawia wnętrze aparatu rentgenowskiego:

- przesuwana płyta szklana, która może być otwarta po zwolnieniu blokady; aparat rentgenowski pracuje tylko wtedy, gdy zasłona przesuwana jest zamknięta,
- otwór umożliwiający mocowanie przesłon dla wiązki promieniowania rentgenowskiego (przesłony przechowywane są w szufladzie),
- para wejść umożliwiających doprowadzenie zasilania do przestrzeni eksperymentalnej z wejścia "INPUT" znajdującego się na panelu sterowania ręcznego (patrz rys. 3 poz. 11),
- złącze SUB-D do sterowania goniometrem; aparat musi być wyłączony podczas podłączania lub odłączania goniometru,
- 5. złącze BNC do podłączenia licznika G-M,



Rys.1 Widok aparatu rentgenowskiego z goniometrem i licznikiem G-M



Rys.2 Widok wnętrza aparatu rentgenowskiego

6. tunel wyprowadzający dodatkowe przewody na zewnątrz przestrzeni eksperymentalnej,

- ekran fluorescencyjny wykonany ze szkła akrylowego zawierającego ołów pokryty luminoforem,
- 8. oświetlenie wewnętrzne,
- 9. otwory gwintowane pozwalające umocować goniometr.

2.3 Panel sterowania ręcznego

Rysunek 3 przedstawia panel sterowania ręcznego:



- pokrętło ustawiania wartości służące do precyzyjnego nastawiania poszczególnych parametrów pomiaru; wartość wybranego parametru jest prezentowana na wyświetlaczu cyfrowym i zostaje zatwierdzona po naciśnięciu klawisza "ENTER",
- 2. przycisk "ENTER" służy do zatwierdzania ustawień,
- przycisk "HV-I" po jego naciśnięciu można ustawić wartość wysokiego napięcia lampy rentgenowskiej (0 – 35 kV), a po ponownym naciśnięciu wartość natężeni prądu (0 – 1 mA); dioda LED sygnalizuje, która z wielkości jest ustawiana; aktualna wartość napięcia lub natężenia prądu jest prezentowana na wyświetlaczu cyfrowym,
- przycisk "GATE-TIME" służy do wyboru trybu pracy: GATE czas zliczania impulsów (w przedziale 0,5 – 100s), TIME – czas ekspozycji dla doświadczeń z fotografią rentgenowską (w przedziale 1 – 10000 min),
- 5. część panelu sterowania służąca do ustawiania warunków pracy goniometru,
- 5.1 przycisk "MAN-AUTO" pozwala na automatyczne lub ręczne (pokrętłem ustawiania wartości) obracanie licznikiem G-M lub próbką,
- 5.2 przycisk z symbolem *licznik* lub *licznik + kryształ* służy do wyboru przesuwu samej
 próbki lub próbki i licznika synchronicznie lub niezależnie,
- 5.3 przycisk "START-STOP-°/S" umożliwia wprowadzenie pozycji początkowej i końcowej goniometru oraz wartości kroku przesuwu,
- przycisk "HV-ON" uruchamia lampę rentgenowską z parametrami wcześniej zadanymi,

- przycisk "START-STOP" uruchamia pomiar (przesuw goniometru i licznika i/lub próbki oraz procedurę zliczania),
- przycisk "RESET" jego naciśnięcie przywraca początkowe położenie licznika i próbki,
- 9. przycisk z symbolem głośnik włącza akustyczne potwierdzanie zliczania impulsów,
- 10. część panelu sterowania z wyjściami analogowymi
- 10.1 przycisk z symbolem *licznik* i *kryształ* służy do włączania wyjścia napięcia analogowego (pary wyjść 10.2) proporcjonalnego do pozycji kątowej licznika lub próbki,
- 10.2 para wyjść napięcia proporcjonalnego do kąta położenia licznika lub próbki,
- 10.3 para wyjść "IMP/S" napięcia proporcjonalnego do liczby zliczeń licznika G-M,
- 11. para wejść "INPUT" połączonych z gniazdami wewnątrz przestrzeni eksperymentalnej aparatu rentgenowskiego (rys. 2 poz. 3),
- 12. włącznik oświetlenia wewnętrznego,
- 13. złącze "PC/RS232", umożliwiające połączenie aparatu z komputerem PC; połączenie z komputerem jest sygnalizowane przez diodę LED nr 14.

2.4 Wyświetlacze cyfrowe

W górnej części aparatu rentgenowskiego znajdują się dwa czterosegmentowe wyświetlacze cyfrowe, na których prezentowane są wartości liczbowe ustawianych parametrów pracy przyrządu. Bezpośrednio za nimi znajdują się wyświetlacze LED, na których prezentowane są jednostki nastawianych wielkości. Po włączeniu zasilania w jednym z okien prezentowany jest symbol lampy rentgenowskiej znajdującej się wewnątrz aparatu (Cu).

2.5 Goniometr

Goniometr jest wyposażony w dwa silniki krokowe służące do niezależnego obracania próbki i licznika pracujące w zakresie kątów -10° do +170°. Możliwe jest ustawienie synchronicznego obracania licznika i próbki w proporcji kątowej 2:1. Najważniejsze elementy goniometru zostały przedstawione na rysunku 4:

- 1. elementy gwintowane umożliwiające zamocowanie goniometru wewnątrz aparatu rentgenowskiego,
- 2. uchwyt licznika G-M,

- 3. pokrętło umożliwiające unieruchomienie licznika w uchwycie,
- 4. pokrętło blokujące przesuw uchwytu do i od próbki (osi obrotu),
- 5. diafragma licznika G-M,
- 6. nakrętka mocująca diafragmę,
- ramiona, do których zamocowany jest układ detekcyjny umożliwiające jego przesuwanie do i od osi obrotu (próbki).

Na rysunku 5 przedstawiony jest widok goniometru z góry:

- pokrętło służące do unieruchamiania głównej części goniometru; jego zwolnienie pozwala na przesuwanie próbki do lub od lampy rentgenowskiej; w tej czynności pomocną może być skala znajdująca się dolnej części goniometru,
- ramię, na którym zamocowana jest zasadnicza część goniometru umożliwiająca przesuwanie próbki do i od źródła promieniowania,
- element zabezpieczający przewód licznika G-M.

Uwaga:

 a. Przy pomiarach dla dużych kątów ważne jest ustawienie goniometru w takiej odległości 



Rys.5 Widok goniometru z góry

by obudowa licznika G-M podczas jego ruchu nie mogła dotknąć obudowy aparatu.

b. Podczas podłączania lub odłączania goniometru należy wyłączyć zasilanie całego aparatu.

3. Oprogramowanie pomiarowe Measure

3.1 Sterowanie aparatem rentgenowskim

Aparat rentgenowski *Phywe X-ray unit* może być sterowany ręcznie w panelu sterowania znajdującym się na płycie czołowej urządzenia (rys. 3) lub z zastosowaniem komputera PC, na którym zainstalowany jest program sterujący, gromadzący i wizualizujący dane pomiarowe. Producent oferuje oprogramowanie o nazwie *Measure*.

3.2 Program Measure

Po włączeniu zasilania aparatu rentgenowskiego należy włączyć komputer i dwu-

krotnie nacisnąć żółtą ikonę M – skrót do programu *Measure*. Wykonanie tej czynności powoduje uruchomienie głównego okna programu – widok części tego okna przedstawia rysunek 1.

W celu przeprowadzenia pomiarów należy wybrać opcję **File** a następnie **New measurement** lub nacisnąć klawisz z symbolem nagrywania (duża czerwona kropka).

Wykonanie tej czynności uruchamia okno ustawień pomiaru widoczne na rysunku 2.

W oknie tym dokonuje się ustawień parametrów pomiarów wykonywanych aparatem rentgenowskim. Tabela nr 1 zawiera opis poszczególnych pól tego okna oraz ich zalecane ustawienia dla ćwiczenia *Promieniowanie rentgenowskie*.

special	C transmis	sion curve	in (C)	pulse count C Compton experiment
X-data				Emissions current
Crystal an	gle		•	1 mA 2 s
Voltage				Rotation mode
		2.1 coupled mode		
C variable	e voltage			C fixed crystal angle
minimal voltage 5 KV		C both angles constant		
maximal voltage 35 KV		L ⊢ Crystal angle		
voltage	increment	2	 K∀	starting angle
Setup				stopping angle
Anode ma	terial Cu			angle increment 0,1 *
Crystal	LiF (100); d=20	1,4pm	•	Displays
Absorber	no absorber 💽		•	Crystal angle 🔽 Impulse rate
Filter	no filter 💌		Detector angle 🔽 Spectrum	
	Crystal / Absorber / Filter			Emissions current

Rys.2 Widok okna ustawień pomiaru

Akceptacji wszystkich

ustawień (jednoznacznej z przejściem do okna uruchamiającego pomiar) dokonuje się naciskając przycisk *Kontynuuj (Continue)*.

	16 XX					
	F L	3)	8			04.
New	mea	sur	eme	nt	4	ħ

m measure

Rys.1 Widok części okna głównego programu *Measure*

Орсја					
j. angielski j. polski		Funkcja / zalecane ustawienia w ćwiczeniu			
Type of measurement	Rodzaj pomiaru	Wybieranie trybu pomiaru: spektrum (spectra)			
X-data	Oś X	Określa oś odciętych: kąt padania (crystal angle)			
Voltage	Napięcie	Definiuje napięcie anodowe lampy rentgenowskiej. Należy wpisać wartość napięcia w kV (≤ 35 kV)			
Emission current	Prąd emisyjny	Definiuje prąd anodowy lampy rentgenowskiej. Nale- ży wpisać wartość prądu w mA (≤ 1 mA)			
Integration time	Czas zliczania	Określa czas zliczania licznika G-M dla pojedynczego pomiaru			
Rotation mode	Sposób obracania	Określa sposób obracania kryształu oraz licznika G-M			
Crystal angle	Kąt padania	Ustawia wartości kątów początkowego i końcowego oraz kroku pomiarowego. Optymalne wykorzystanie czasu pomiarowego wymusza różne ustawienia dla różnych badanych kryształów			
Setup	Ustawienia	Ustawienia wykorzystywane przez część oprogramo- wania służącą do analizy danych			
Displays	Prezentowanie	Wybieranie trybu prezentowania wartości ustawień podczas procesu pomiarowego			

Po wprowadzeniu i zaakceptowaniu ustawień program przechodzi do okna pomiaru

składającego się z podokien zawierających wartości ustawień oraz wyniki trwającego pomiaru. Najważniejszą część tego okna,

			Crystal angle		
Rate at 15kV	PHYWE		starting angle	2,5	a
0	Start measurement	B	stopping angle	17	a
Duration	Stop measurement		angle increment	la d	_
00:00:00	Remeasure	*	angle increment	10,1	

Rys.3 Widok okno uruchamiającego pomiar

umożliwiającą rozpoczęcie lub zatrzymanie pomiaru, pokazano na rysunku 3.

Naciśnięcie klawisza *Start measurement (Uruchom pomiar)* powoduje rozpoczęcie pomiaru i w efekcie zmianę opisu klawisza na *Pause measurement (Wstrzymaj pomiar)*. Naciśnięcie klawisza ze strzałką powoduje minimalizację okna, co pozwala na śledzenie wyników doświadczenia prezentowanych w aktywnych podoknach.

Wybór klawisza *Stop measurement (Zakończ pomiar)* kończy pomiar i w efekcie przeniesienie do głównego (pierwszego) okna programu *Measure*. Czynność ta powoduje także pojawienie się wyników zakończonego pomiaru w postaci wykresu.

Aby dane pomiarowe zapisać w postaci pliku tekstowego należy wybrać opcję Measurement a następnie Export data – patrz rysunek 4. Efektem wykonania tej czynności będzie pojawienie się na ekranie okna eksportowania danych, widocznego na rysunku 5.





Rys.4 Widok zakładki Measurement

Wyniki pomiarów należy zapisać na dysku c:\ w katalogu Wyniki w podkatalogu o nazwie będącej nazwiskiem osoby wykonującej ćwiczenie. Następnie wyniki należy skopiować na dyskietkę 1,44 Mb w celu dalszej obróbki zgodnie z sugestiami prowadzącego ćwiczenie.

Więcej informacji na temat oprogramowania (w języku angielskim) można znaleźć w pomocy programu naciskając klawisz F1 lub w Phywe, User guide.

C. Emisja polowa – Instrukcja do ćwiczenia

1. Zagadnienia teoretyczne

Elektronowa teoria budowy metali, rodzaje emisji elektronów, emisja polowa, praca wyjścia i metody jej wyznaczania, mikroskop polowy – budowa i zasada działania, interpretacja obrazów emisyjnych (rzut stereograficzny).

2. Literatura

- J. Nikliborc, *Emisja polowa elektronów z metali*, Postępy fizyki, tomVIII, zeszyt 1 i 6, PWN, 23-42 i 673-688 (1957)
- T. Greczyło, P. Mazur, E. Dębowska, *Mikroskop polowy w zaawansowanej pra*cowni fizycznej, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom X, nr 4, 2005, 290-295
- 3. T. Greczyło, P. Mazur, E. Dębowska, *Field emission microscope at advanced student's laboratory*, Eur. J. Phys. 27 (2006) 265-272
- 4. J. Chojnacki, Krystalografia chemiczna i fizyczna, PWN, Warszawa 1961
- 5. Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, tom 5, PWN, Warszawa 1973
- 6. L. Kalinowski, Fizyka metali, PWN, Warszawa 1973
- 7. R. H. Good, E. W. Müller, Field emission, Handb. der Phys. 15, (1956),
- 8. *Field Emission Microscope, Instruction Sheet,* Leybold Didactic GMBH, Hurth 2002

3. Cel ćwiczenia

Ćwiczenie umożliwia przeprowadzenie następujących zadań doświadczalnych:

- Rejestracja obrazów emisyjnych ostrza wolframowego tuż po jego przegrzaniu oraz po naparowaniu atomami Ba.
- b. Wyznaczenie zmian pracy wyjścia z ostrza W wywołanych upływem czasu i/lub naparowaniem na nie atomów Ba.

4. Zestaw doświadczalny

Zestaw doświadczalny (rys. 1 w dodatku) składa się z:

- zestawu komputerowego z systemem operacyjnym oraz oprogramowaniem do przechwytywania obrazów wideo FAST Capture i kartą video AVMaster Video v.2.5 FAST Multimedia (wewnątrz komputera);
- komercyjnej lampy mikroskopu polowego Leybold Didactic GMBH w obudowie wraz ze sterowaniem oraz uchwytem na cyfrową kamerę wideo MINTRON MS-1131c;
- nanoamperomierza prądu stałego MERA TRONIK V623 ;
- zasilacza wysokiego napięcia POLON ZWN41;
- zasilacza UNITRA UNIMA 5351 służącego do przegrzewania źródła baru podczas naparowywania;
- zasilacza VOLTCRAFT DIGI35 służącego do przegrzewania oczyszczania ostrza wolframowego lampy mikroskopowej.

5. Część doświadczalna

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy zapoznać się ze skróconym opisem zestawu pomiarowego oraz z oprogramowaniem *FAST Capture*. Poniżej zapisano możliwe do przeprowadzenia pomiary – prowadzący decyduje, który ze scenariuszy doświadczania wykonuje student.

a. Rejestracja obrazu emisyjnego ostrza wolframowego tuż po jego przegrzaniu, wyznaczanie pracy wyjścia elektronów z tego ostrza oraz wyznaczanie zmian pracy wyjścia elektronów z czasem

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- zarejestrować obraz ostrza wolframowego przed procedurą przegrzewania dla natężenia prądu emisji 100 nA;
- przegrzać ostrze wolframowe przepuszczając przez pętlę, do której jest przymocowane, prąd o natężeniu 1,6 A przez 10 s;
- natychmiast po przegrzaniu przyłożyć napięcie wywołujące prąd emisyjny *I*=100 nA;
- następnie zmniejszać napięcie w 8 krokach, kolejno o ΔU=20 V i notować wartości natężenia prądu emisyjnego I (seria pomiarowa powinna trwać około 30 s)
 wyniki umożliwią wykreślenie zależności I=f(U);
- pomiary powtórzyć trzy krotnie w odstępach 2 minutowych;

 na podstawie wyników pomiarów dla kolejnych serii wyznaczyć wartości pracy wyjścia elektronów.

b. Rejestracja obrazu emisyjnego ostrza pokrytego Ba, wyznaczenie pracy wyjścia z ostrza pokrytego Ba oraz wyznaczenie zmian pracy wyjścia z czasem

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- zarejestrować obraz ostrza wolframowego przed procedurą przegrzewania dla natężenia prądu emisji 100 nA;
- natychmiast po przegrzaniu przyłożyć napięcie wywołujące prąd emisyjny o natężeniu *I*=100 nA;
- następnie zmniejszać napięcie w 8 krokach, kolejno o ΔU=20 V i notować wartości natężenia prądu emisyjnego I (seria pomiarowa powinna trwać około 30 s)
 – wyniki umożliwią wykreślenie zależności I=f(U);
- natychmiast po zakończeniu pomiarów naparować na ostrze atomy Ba ze źródła zwiększając jego temperaturę wskutek przepływu prądu o natężeniu I_{Ba}=8 A w czasie 20 s;
- natychmiast po przegrzaniu przyłożyć napięcie wywołujące natężenie prądu emisyjnego *I*=100 nA;
- następnie zmniejszać napięcie w 8 krokach, kolejno o $\Delta U=20$ V i notować wartości prądu emisyjnego *I*; wyniki umożliwią wykreślenie zależności *I*=f(*U*); seria pomiarowa powinna trwać około 30s;
- pomiary powtórzyć trzy krotnie w odstępach 2 minutowych;
- na podstawie wyników dla kolejnych serii wyznaczyć wartości pracy wyjścia elektronów.

c. Rejestracja obrazu emisyjnego ostrza pokrytego Ba, wyznaczenie pracy wyjścia z ostrza pokrytego Ba oraz wyznaczenie zmian pracy wyjścia wywołanych kolejnymi naparowaniami

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- zarejestrować obraz ostrza wolframowego przed procedurą przegrzewania dla natężenia prądu emisji 100 nA;
- natychmiast po przegrzaniu przyłożyć napięcie wywołujące prąd emisyjny o natężeniu *I*=100 nA;

- następnie zmniejszać napięcie w 8 krokach, kolejno o ΔU=20 V i notować wartości natężenia prądu emisyjnego I (seria pomiarowa powinna trwać około 30 s)
 – wyniki umożliwią wykreślenie zależności I=f(U);
- naparować na ostrze atomy Ba ze źródła zwiększając jego temperaturę wskutek przepływ prądu o natężeniu I_{Ba}=8 A w czasie 20 s;
- natychmiast po przegrzaniu przyłożyć napięcie wywołujące prąd emisyjny o natężeniu *I*=100 nA;
- następnie zmniejszać napięcie w 8 krokach, kolejno o ΔU=20 V i notować wartości natężenia prądu emisyjnego I (seria pomiarowa powinna trwa około 30 s) – wyniki umożliwią wykreślenie zależności I=f(U);
- powtórnie naparować ostrze atomami Ba i powtórzyć pomiar.
- d. Rejestracja obrazu emisyjnego ostrza wolframowego tuż po jego przegrzaniu i ostrza naparowanego Ba oraz rejestracja zmian natężenia prądu emisyjnego z czasem dla tego ostrza i dla ostrza naparowanego

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- zarejestrować obraz ostrza wolframowego przed procedurą przegrzewania dla prądu emisji o natężeniu 100 nA;
- przegrzać ostrze wolframowe przepuszczając przez pętlę, do której jest przymocowane prąd o natężeniu 1,6 A przez 10 s;
- natychmiast po przegrzaniu przyłożyć napięcie wywołujące prąd emisyjny o natężeniu *I*=100 nA i dokonać pomiaru zmian natężenia prądu emisji z czasem, aż do momentu, w którym natężenie osiągnie wartość zadaną przez prowadzącego zajęcia;
- analogiczne pomiary powtórzyć dla ostrza naparowanego Ba.

6. Niepewności pomiarowe

Przed przystąpieniem do opracowania niepewności pomiarowych zapoznać się z instrukcją Ocena niepewności pomiarowych w II Pracowni Fizycznej.

Podczas wykreślania zależności $\ln \frac{I}{U^2} = f\left(\frac{1}{U}\right)$ na wykresach nanieść niepewności poszczególnych wielkości wynikające z uwzględnienia niepewności wzorcowania i niepewności eksperymentatora dla wartości napięcia i natężenia prądu oraz prawa przeno-

szenia niepewności standardowych. Następnie wykorzystać metodę regresji liniowej (metoda najmniejszych kwadratów) do wyznaczenia współczynnika nachylenia prostej najlepszego dopasowania do wyników eksperymentalnych oraz jego niepewności standardowej. Ostatecznie do wyznaczenia niepewności pracy wyjścia wykorzystać prawo przenoszenia niepewności standardowych.

7. Dodatek



Rys.1 Widok poszczególnych elementów zestawu pomiarowego




Rys. 3. Przykładowe charakterystyki Fowlera-Nordheima dla ostrza wolframowego tuż po jego przegrzaniu (z prawej) oraz po 2,5; 5; i 7,5 minutach wraz z obrazami emisyjnymi.

D. Makroskopowy model mikroskopu sił atomowych – Instrukcja do ćwiczenia

1. Zagadnienia teoretyczne

Drgania pręta jednostronnie zamocowanego, rezonans mechaniczny, zjawisko piezoelektryczne, oddziaływania międzyatomowe, mikroskop sił atomowych, struktura krystalograficzna powierzchni.

2. Literatura

- Ch. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999
- 2. H. Ibach, H.Lüth, *Fizyka ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996
- 3. Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, tom 5, PWN, Warszawa 1973
- M. Kwiek, A. Śliwiński, E. Hojan Akustyka laboratoryjna, część II, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa-Poznań (1971)
- 5. T. Greczyło, E. Dębowska, *The macroscopic model of an atomic force microscope at students' laboratory*, Eur. J. Phys. 27 (2006) 501-513
- 6. B. Kozarzewski, *Fizyka zjawisk mikroskopowych*, skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków 1994,
- 7. Przewodnik po COACH 5, fragmenty.

3. Cele ćwiczenia

Ćwiczenie składa się z 4 etapów doświadczalnych, w których należy:

- a. Wyznaczyć 4 pierwsze częstotliwości drgań własnych belki modelu mikroskopu sił atomowych i porównać je z wartościami teoretycznym. Sporządzić charakterystyki rezonansowe.
- b. Zbadać zależność wartości siły, z jaką odpychają się dwa magnesy neodymowe, od odległości między ich powierzchniami.
- c. Zbadać jak zmieniają się wybrane częstotliwości drgań własnych belki modelu, podczas gdy na jej swobodny koniec działa siła o określonej wartości.
- d. Zobrazować model powierzchni ciała stałego z zastosowaniem makroskopowego modelu mikroskopu sił atomowych.

4. Zestaw doświadczalny

Zestaw doświadczalny składa się z:

- makroskopowego modelu mikroskopu sił atomowych,
- generatora akustycznego,
- mikrowoltomierza cyfrowego i oscyloskopu,
- czujnika siły oraz śruby mikrometrycznej z magnesem neodymowym,
- modelu powierzchni ciała stałego,
- komputera z interfejsem pomiarowym wraz z oprogramowaniem umożliwiającym sterowanie modelem oraz gromadzenie danych.

5. Część doświadczalna

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy zapoznać się z opisem interfejsu pomiarowego *Control Box* oraz oprogramowaniem *COACH 5*.

a. Wyznaczanie 4 pierwszych częstotliwości drgań własnych belki modelu mikroskopu sił atomowych

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- podłączyć generator akustyczny do przetwornika piezoelektrycznego znajdującego się bliżej zamocowanego końca belki modelu;
- podłączyć mikrowoltomierz cyfrowy oraz oscyloskop do przetwornika piezoelektrycznego znajdującego się bliżej swobodnego końca belki modelu;
- przeprowadzić pomiary umożliwiające znalezienie 4 pierwszych częstotliwości drgań własnych belki modelu;
- porównać otrzymane w doświadczeniu wartości częstotliwości drgań własnych belki z wielkościami teoretycznymi;
- sporządzić charakterystyki rezonansowe dla wybranych częstotliwości drgań własnych.

b. Badanie zależności wartości siły, z jaką odpychają się dwa magnesy neodymowe, od odległości między ich powierzchniami

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

 umocować czujnik siły zakończony magnesem neodymowym oraz śrubę mikrometryczną, z zamocowanym na niej drugim magnesem neodymowym, na wspólnym statywie; wzajemne położenie czujnika i śruby należy dobrać tak, by przy maksymalnie rozkręconej śrubie odległość pomiędzy powierzchniami magnesów była h>30 mm;

- wyznaczyć początkową odległość pomiędzy powierzchniami magnesów i przyjąć, że wówczas siła wzajemnego oddziaływania magnesów F=0 N;
- połączyć czujnik z interfejsem pomiarowym i uruchomić program Coach 5;
- przeprowadzić pomiary umożliwiające znalezienie zależności wartości siły, z jaką odpychają się dwa magnesy neodymowe, od odległości między ich powierzchniami;
- sporządzić wykres prezentujący wyniki powyższych pomiarów.
- c. Badanie zmian wybranych częstotliwości drgań własnych belki modelu, podczas spowodowanych działaniem na jej swobodny koniec siły o określonej wartości

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- podłączyć generator akustyczny do przetwornika piezoelektrycznego znajdującego się bliżej zamocowanego końca belki modelu;
- podłączyć mikrowoltomierz cyfrowy oraz oscyloskop do przetwornika piezoelektrycznego znajdującego się bliżej swobodnego końca belki modelu;
- umieścić mechanizm umożliwiający poruszanie się modelu powierzchni (model umieszczony jest na podnośniku trapezowym) centralnie pod swobodnym końcem belki modelu i ręcznie przesunąć tak, by jeden z magnesów znajdował się tuż pod magnesem zamocowanym do belki;
- wyznaczyć odległość pomiędzy powierzchniami magnesów (przymocowanego do belki oraz leżącego na modelu powierzchni) i, posługując się wykresem zależności siły odpychania się magnesów od odległości, wyznaczyć wartość siły odpychającej;
- przeprowadzić pomiary umożliwiające znalezienie 4 pierwszych częstotliwości drgań własnych belki modelu, podczas gdy na jej swobodny koniec działa siła o określonej wartości;
- porównać otrzymane w doświadczeniu wartości z wielkościami teoretycznymi;
- sporządzić charakterystyki rezonansowe.

d. Obrazowanie modelu powierzchni ciała stałego z zastosowaniem makroskopowego modelu mikroskopu sił atomowych

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

- podłączyć generator akustyczny do przetwornika piezoelektrycznego znajdującego się bliżej zamocowanego końca belki modelu i ustawić częstotliwość pracy modelu;
- podłączyć mikrowoltomierz cyfrowy oraz oscyloskop do przetwornika piezoelektrycznego znajdującego się bliżej swobodnego końca belki modelu oraz do interfejsu pomiarowego *Control Box*;
- umieścić model powierzchni wraz z podnośnikiem trapezowym centralnie pod swobodnym końcem belki modelu;
- zapoznać się z programem sterującym ruchem modelu powierzchni ciała stałego oraz rejestrującym wartości wielkości mierzonych w doświadczeniu;
- uruchomić procedurę pozwalającą odwzorować powierzchnię modelu ciała stałego za pomocą modelu mikroskopu sił atomowych;
- przedstawić wyniki w postaci wykresu trójwymiarowego.

6. Opracowanie niepewności pomiarowych

Przed przystąpieniem do opracowania niepewności pomiarowych zapoznać się z instrukcją Ocena niepewności pomiarowych w II Pracowni Fizycznej.

Podczas szacowania niepewności poszczególnych wielkości uwzględniać niepewności wzorcowania i niepewności eksperymentatora oraz korzystać z prawa przenoszenia niepewności standardowych.

X. LITERATURA

- [1] ISO, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Switzerland 1995
- K. H. Elliott, C. A. Mayhew, The use of commercial CCD cameras as linear detectors in the physics undergraduate teaching laboratory, Eur. J. Phys. 19 (1998) 107-116
- [3]^{*} T. Lewowski, L. Lewowska, P. Mazur, *Measurement of the effect of Coriolis and centrifugal forces on the trajectory of a body in a rotating frame*, Eur. J. Phys. 20 (1999) 109-116
- [4]^{*} J. Riera, J. A. Monsoriu, M. H. Gimenez, Using image recognition to automate video analysis of physical processes, Am. J. Phys. 71 (2003) 1075-1079
- [5] F. Kaczmarek red., II pracownia fizyczna, PWN, Warszawa Poznań 1976
- [6] T. Marcinow, *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, II Pracownia*, Skrypty, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1979
- [7] Plan studiów licencjackich i magisterskich fizyki na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego (http://www.wfa.uni.wroc.pl/)
- [8] H. Szydłowski, Pracownia fizyczna wspomagana komputerem, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003
- [9] Wyrażanie niepewności pomiarowych: Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999
- [10][▲] T. Greczyło, E. Dębowska, Using a digital video camera to examine coupled oscillations, Eur. J. Phys. 23 (2002) 441-447
- [11] M. Smoluchowski, Zür kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen, Ann. d. Physik 21 (1906), 756-780
- [12] A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski, Wstęp do fizyki, tom I, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1976
- [13]* R. Salmon, C. Robbins, K. Forinash, *Brownian motion using video capture*, Eur. J. Phys. 23 (2002), 249-253
- [14][▲] S. Chandrasekhar, Stochastic problems in physics and astronomy, Rev. Mod.
 Phys. 15, 1 (1943), 1-89
- [15] R. Kroning ed., Textbook of Physics, Pergamon Press, London 1959
- [16] J. B. Perrin, Mouvement Brownien et réalité moléculaire, Annales de chimie et de physiqe VIII 18, 5-114 (1909). Tłumaczenie angielskie: Brownian Movement and Molecular Reality, London, Taylor and Francis, 1909

- [17] Wikipedia Wolna Encyklopedia, http://pl.wikipedia.org/wiki/Liczba_Avogadra
- [18] S. Frisz, A. Timoriewa, Kurs fizyki, tom II, PWN, Warszawa 1959
- [19] G. Kupryszewski, Wstęp do chemii organicznej, Wydawnictwo Gdańskie, Gdańsk 1994
- [20] Encyklopedia fizyczna, tom I, PWN, Warszawa 1972
- [21] A. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN, Warszawa 1969
- [22]^{*} COACH Zeszyt ćwiczeń, CMA/AMSTEL Institute, Amsterdam 2001
- [23] J. Turło, A. Karbowski, K. Służewski, Przykłady wykorzystania metody interaktywnego wideo w nauczaniu fizyki, materiały konferencyjne Informatyka w Szkole XVIII, cześć 2, (2002), 572-576
- [24] T. Greczyło, Kamera wideo i oprogramowanie pomiarowe nową generacją środków wspomagających nauczanie fizyki, materiały konferencyjne Informatyka w Szkole XVIII, cześć 2, (2002), 539-542
- [25] Przewodnik po COACH5, CMA/AMSTEL Institute, Amsterdam 2003
- [26] http://www.videoguys.com
- [27] http://www.virtualdub.org
- [28][•] T. Greczyło, E. Dębowska, Digital video camera and ultrasonic distance sensor examine coupled torsional and longitudinal oscillations, Proceedings of MPTL-7, (Multimedia in Physics Teaching and Learning), http://informando.infm.it/ MPTL/proceedings.htm, (2002)
- [29] Ch. D. Hodgman, *Handbook of Chemistry and Physics*, 40th edition, Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio 1959
- [30] Ch. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999
- [31] S. Frisz, A. Timoriewa, Kurs fizyki, tom III, PWN, Warszawa 1959
- [32] V. Acosta, C. L. Cowan. B. J. Graham, Podstawy fizyki współczesnej, PWN, Warszawa 1987
- [33] Z. Bojarski, E. Łągiewka, *Rentgenowska analiza strukturalna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1988
- [34]^{*} R. Giacconi, Narodziny astronomii rentgenowskiej, Postępy fizyki, tom 55, 19-30 (2004)
- [35] Wikipedia Wolna Encyklopedia, http://pl.wikipedia.org/wiki/Sta%C5%82a_Plancka
- [36] A. S. Dawydow, Teoria jądra atomowego, PWN, Warszawa 1962

- [37] K. Hermbecker, Handbook Physics X-Ray Experiments, Desktop-Publishing, Duderstadt, PHYWE – Series of Publication
- [38] H. Ibach, H.Lüth, *Fizyka ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996
- [39] Robert-Bosch-Breite, X-ray unit Operating Instructions, PHYWE SYSTEME GMBH, Göttingen
- [40] J. Nikliborc, *Emisja polowa elektronów z metali*, Postępy fizyki, tomVIII, zeszyt 1 i 6, PWN, 23-42 i 673-688 (1957)
- [41] K. i J. Przybyłowicz, *Fizyczne podstawy materiałoznawstwa*, Politechnika Świętokrzyska, skrypt nr 279 (http://www.tu.kielce.pl/~wdep/index.htm#r1)
- [42] Encyklopedia fizyczna, tom I, PWN, Warszawa 1972
- [43]* R. W. Wood, A New Form of Cathode Discharge and the Production of X-Rays, together with Some Notes on Diffraction. Preliminary Communication, Phys. Z. 23, 506 (1922)
- [44] J. E. Lilienfeld, *The Roentgen rays of the cathode from the auto-electronic charge*, Phys. Rev. 5, 1 (1897)
- [45] R. H. Fowler, L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A 119, 173 (1928)
- [46] N. A. Kapcow, Elektronika, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1956
- [47] R. H. Good, E. W. Müller, Field emission, Handb. der Phys. 15, (1956)
- [48]* R. O. Jenkins, Field emission of electrons, Physical Society Progress Reports, vol. 9 (1937)
- [49] *Field Emission Microscope, Instruction Sheet,* Leybold Didactic GMBH, Hurth 2002
- [50][▲] B. J. Hopkins, G. C. Riviere, *The work function of polycrystalline tungsten foil*, Proc. Phys. Soc. 81, 590 (1963)
- [51] H. Jefferys, On the Method of Least Squares, Astron. J. 85, 177 (1980)
- [52][▲] M. Lybanon, A better least-squares method when both variables have uncertainties, Am. J. Phys. 52, 22 (1984)
- [53] E. W.Müller, 1936, Z. Phys. Bd. 102, 734
- [54][▲] G. Binning, C. F. Quate, Ch. Geber, Atomic Force Microscope, Phys. Rev. Let., vol. 56, no. 9, 930-933 (1986)
- [55]* G. Binnig, H. Rohrer, Scanning Tunneling Microscopy From Birth to Adolescence, Rev. Mod. Phys. vol. 59, no. 3, part I, (1987)

- [56]* P. E. Marszałek, Chemiczna identyfikacja pojedynczych makromolekuł za pomocą mikroskopii sił atomowych, Postępy fizyki, tom 53D, 176-179 (2002)
- [57][▲] F. R. Zypman, C. Guerra-Vela, *The microscopic scanning force 'microscope'*, Eur. J. Phys. 22, 17-30, (2001)
- [58] M. Kwiek, A. Śliwiński, E. Hojan Akustyka laboratoryjna, część II, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa-Poznań (1971)
- [59] Z. Kleszczewski, Podstawy akustyki, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Bielsko-Biała (1995)
- [60] D. Sarid, Scanning Force Microscopy, Oxford University Press, New York (1994)
- [61]^{*} C. Guerra-Vela, F. R. Zypman, *The poor man's scanning force microscope*, Eur. J. Phys. 23, 145-153, (2002)
- [62]* F. J. Giessibl, A direct method to calculate tip-sample forces from frequency shift in frequency-modulation atomic force microscopy, App. Phys. Lett. vol. 78, no. 1, 123-125, (2001)