

Dyfrakcja wysokoenergetycznych elektronów RHEED

Ryszard Zdyb

Cel ćwiczenia

Wyznaczenie stałej sieci monokryształu krzemu.
Poznanie powierzchniowo czułej techniki dyfrakcyjnej – odbiciowej dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów RHEED.
Nabycie umiejętności interpretacji podstawowych cech obrazów dyfrakcyjnych RHEED.



Zakres ćwiczenia

1. Rejestracja obrazów dyfrakcyjnych.
2. Wyznaczenie podstawowych wektorów translacji dwuwymiarowej sieci.
3. Określenie typu sieci krystalograficznej.
4. Wyznaczenie stałej sieci Si.

Informacje wprowadzające

1. Sieć prosta i sieć odwrotna.
2. Dyfrakcja elektronów.
3. Technika RHEED.
4. Konstrukcja Ewalda w metodzie RHEED.
5. Komora ultra wysokiej próżni.
6. Dyfraktometr RHEED

Sieć prosta i sieć odwrotna [1]

Sieć jest matematycznym obiektem składającym się z punktów ułożonych w przestrzeni w okresowy sposób. Jest to zbiór punktów, których położenie jest zdefiniowane przez wektor $\mathbf{r} = u_1\mathbf{a} + u_2\mathbf{b} + u_3\mathbf{c}$, gdzie $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ są podstawowymi wektorami translacji, a u_1, u_2, u_3 są dowolnymi liczbami całkowitymi. Translacja o wektor \mathbf{r} przeprowadza dany punkt sieci w inny punkt tej sieci.

Kryształ tworzą atomy lub grupy atomów (baza atomowa), które związane są z punktami definiującymi sieć – tak zwanymi węzłami sieci.

W przestrzeni dwuwymiarowej istnieje pięć typów sieci tzw. sieci Bravais'go: ukośna, prostokątna, prostokątna centrowana, kwadratowa i heksagonalna. W przestrzeni

trójwymiarowej istnieje siedem układów krystalograficznych, które dają w sumie czternaście typów sieci Bravais'go. Układy krystalograficzne: trójskośny, jednoskośny, rombowy, tetragonalny, regularny, romboedryczny i heksagonalny. Układ regularny posiada trzy sieci Bravais'go: sieć prosta (simple cubic – sc), sieć powierzchniowo centrowana (face centered cubic – fcc) oraz przestrzennie centrowana (body centered cubic – bcc).

Proste wektory sieci odwrotnej trójwymiarowej sieci rzeczywistej zdefiniowane są następująco:

$$\mathbf{A}^* = 2\pi \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{c}}{V}, \quad \mathbf{B}^* = 2\pi \frac{\mathbf{c} \times \mathbf{a}}{V}, \quad \mathbf{C}^* = 2\pi \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{V}, \quad (1)$$

gdzie: $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ są wektorami translacji, a $V = \mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})$ jest objętością komórki prostej.

Definiując sieć odwrotną dwuwymiarowego kryształu przyjmujemy, że następna płaszczyzna (warstwa atomów) znajduje się nieskończenie daleko. Czyli, gdy $\mathbf{c} = c\mathbf{n}$, gdzie \mathbf{n} jest jednostkowym wektorem prostopadłym do płaszczyzny, w której leżą wektory \mathbf{a} oraz \mathbf{b} , zakładamy, że $c \rightarrow \infty$. Wówczas podstawowe wektory sieci odwrotnej zdefiniowane są następująco:

$$\mathbf{A}^* = 2\pi \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{n}}{S}, \quad \mathbf{B}^* = 2\pi \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{a}}{S}, \quad \mathbf{C}^* = 2\pi \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{V} \rightarrow \mathbf{0}, \quad (2)$$

gdzie $S = \mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{n})$ jest polem powierzchni komórki zbudowanej na wektorach \mathbf{a} i \mathbf{b} . W rezultacie sieć odwrotną tworzą proste zwane prętami. Są one prostopadłe do płaszczyzny, w której leżą wektory \mathbf{A}^* oraz \mathbf{B}^* .

Dyfrakcja elektronów [1]

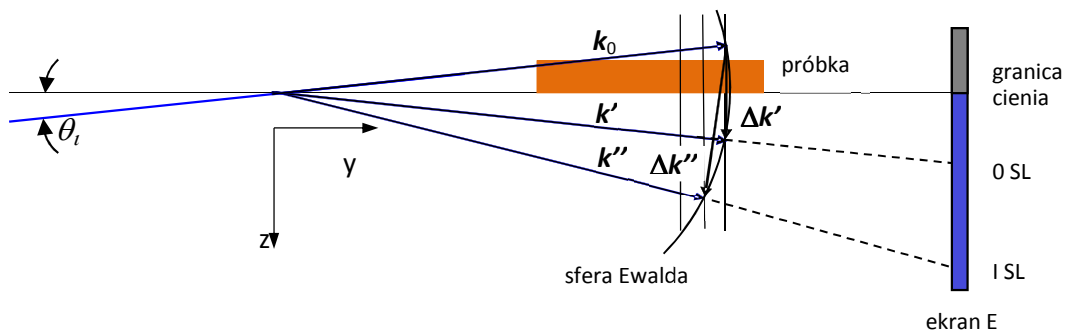
Zgodnie z hipotezą de Broglie'a (1924) oraz jej potwierdzeniu w doświadczeniu Davissona i Germera (1925) oraz niezależnie Thomsona (1927) cząstce można przypisać falę o długości $\lambda = h/p$, gdzie h jest stałą Plancka, a p - pędem cząstki. Uwzględniając falową naturę elektronów ich dyfrakcję na kryształach możemy opisać za pomocą prawa Bragga: $2d \sin \theta = n\lambda$, gdzie d jest odległością międzypłaszczyznową, θ - kątem pomiędzy padającą wiązką a płaszczyzną atomową, n - rzędem ugięcia, λ - długością fali de Broglie'a padających elektronów.

Technika RHEED [1,2]

RHEED – Reflection High Energy Electron Diffraction, czyli odbiciowa dyfrakcja wysokoenergetycznych elektronów. Jest to technika dyfrakcyjna, w której wiązka elektronów o energii od kilku do kilkudziesięciu keV pada na powierzchnię badanej próbki pod kątem od 0° do około 5° do powierzchni próbki, gdzie elektrony ulegają zjawisku dyfrakcji. Kierunki ugiętych na powierzchni kryształu wiązek elektronów można określić stosując konstrukcję Ewalda. Obraz dyfrakcyjny jest obserwowany na ekranie fluorescencyjnym.

2. Konstrukcja Ewalda w metodzie RHEED [2,3]

Do znajdowania warunków dyfrakcji stosowana jest graficzna metoda zwana konstrukcją Ewalda. Wiązka elektronów o wektorze falowym \mathbf{k}_0 pada na próbkę pod kątem θ_i , Rys.1. W wyniku dyfrakcji powstaje szereg wiązek ugiętych. Na ekranie fluorescencyjnym będą widoczne plamki dyfrakcyjne wzdłuż takich kierunków \mathbf{k}' , dla których koniec wektora $\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}' - \mathbf{k}_0$ położony jest w punkcie, w którym pręt sieci odwrotnej przecina sferę Ewalda. Jest to sfera o promieniu $|\mathbf{k}_0|$, przy czym $|\mathbf{k}_0| = |\mathbf{k}'|$. Przecięcie wektora \mathbf{k}' z prętami sieci odwrotnej tworzy zerową strefę Lauego, wektora \mathbf{k}'' - pierwszą strefę Lauego itd.



Rys.1 Dwuwymiarowy szkic konstrukcji Ewalda w geometrii RHEED.

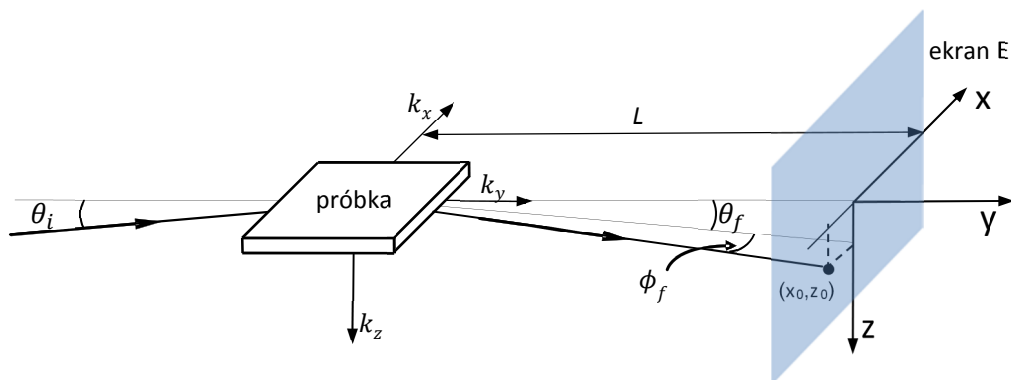
0 SL – zerowa strefa Lauego, I SL – pierwsza strefa Lauego.

Gdy wektor \mathbf{k}_0 jest w płaszczyźnie yz to wtedy składowe wektora rozproszenia $\Delta\mathbf{k}$ mają następującą postać:

$$\begin{aligned}\Delta k_x &= k_0 \cos \theta_f \sin \phi_f, \\ \Delta k_y &= k_0 (\cos \theta_f \cos \phi_f - \cos \theta_i), \\ \Delta k_z &= k_0 (\sin \theta_f + \sin \theta_i),\end{aligned}\quad (3)$$

gdzie: Δk_x i Δk_y są składowymi równoległymi, a Δk_z - prostopadłą do powierzchni próbki, k_0 jest długością wektora falowego padających elektronów, θ_i i θ_f są kątami odpowiednio

padania i ugięcia wiązki elektronów a ϕ_f kątem azymutalnym ugięcia w płaszczyźnie równoległej do powierzchni próbki, Rys.2.



Rys.2 Szkic definiujący parametry potrzebne do przyporządkowania plamce dyfrakcyjnej składowych Δk_x , Δk_y i Δk_z wektora rozpraszania $\Delta \mathbf{k}$.

Znajomość odległości próbki od ekranu fluorescencyjnego L oraz odległości plamki dyfrakcyjnej od granicy cienia z_0 i płaszczyzny padania wiązki elektronów x_0 umożliwia przyporządkowanie jej kątów θ_f i ϕ_f . Następnie korzystając z równań (3) plamce zostają przyporządkowane składowe Δk_x , Δk_y i Δk_z wektora rozpraszania $\Delta \mathbf{k}$. Określając w ten sposób składowe wektora $\Delta \mathbf{k}$ widocznych na ekranie plamek dyfrakcyjnych, z obrazów RHEED zarejestrowanych z wiązką elektronów padającą równoległe do dwu kierunków krystalograficznych powierzchni, możliwe jest wyznaczenie podstawowych wektorów sieci odwrotnej i prostej badanej powierzchni. Znajomość podstawowych wektorów sieci prostej umożliwia wyznaczenie stałej sieci krzemu.

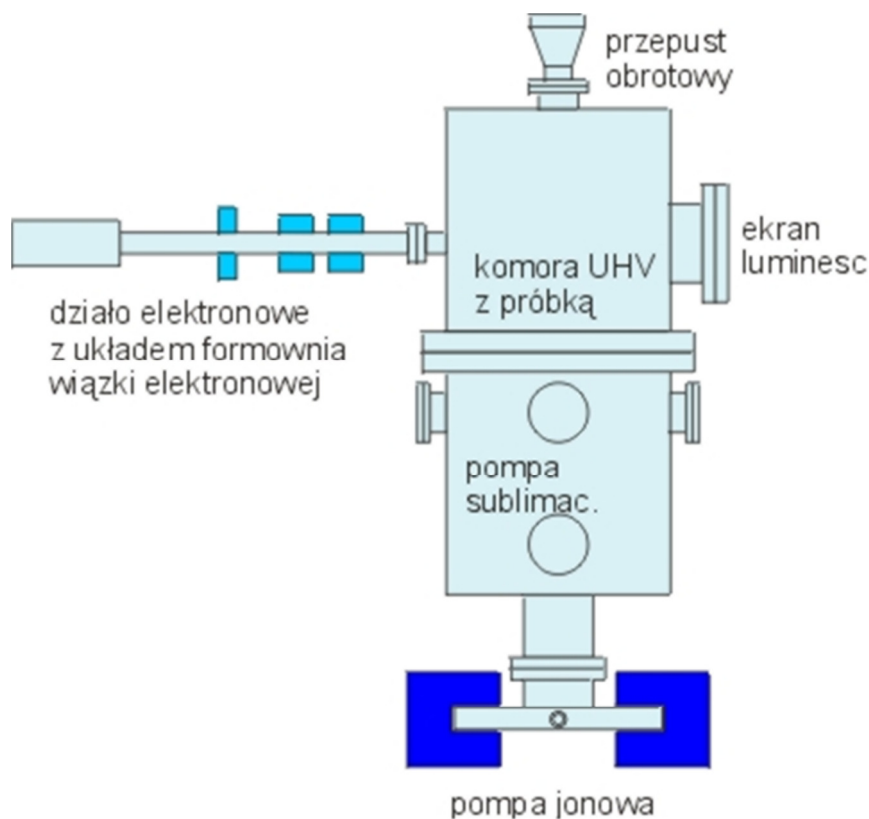
Komora ultra wysokiej próżni

Komora ultra wysokiej próżni (UHV – ultra high vacuum) zbudowana jest ze stali kwasoodpornej. Niskie ciśnienie w komorze zapewniane jest przez pompę jonową PZK-100. Przy ciśnieniu rzędu 10^{-8} mbara typowe parametry pracy pompy jonowej są następujące: napięcie 5 kV, prąd $< 1 \mu\text{A}$. Pomiar ciśnienia dokonywany jest za pomocą głowicy jonizacyjnej Bayarda-Alperta podłączonej do próżniomierza PJ-8. Głowica pracuje przy prądzie emisji równym 1 mA.

Badana próbka Si znajduje się w uchwycie zamontowanym na końcu przepustu obrotowego. Przepust ten umożliwia obrót próbki względem padającej wiązki elektronów i obserwację obrazów dyfrakcyjnych RHEED wzdłuż różnych kierunków krystalograficznych.

Wewnątrz komory, do kryształu Si podłączone są dwa metalowe kontakty umożliwiające przepuszczenie przez próbkę prądu w celu jej oczyszczenia. Wyjścia prądowe z komory UHV znajdują się na przepuszczeniu prądowym.

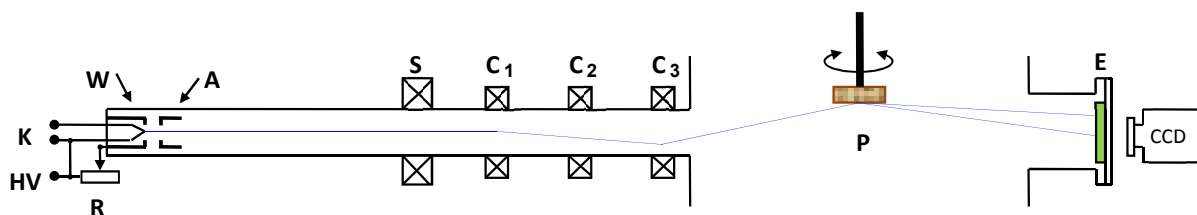
Do komory UHV podłączony jest dyfraktometr RHEED wraz z ekranem fluorescencyjnym, na którym wyświetlane są obrazy dyfrakcyjne.



Rys. 3. Szkic komory UHV z dyfraktometrem RHEED.

Dyfraktometr RHEED [2]

Wiązka elektronów wytwarzana jest przez wolframową katodę **K**, przez którą przepuszczany jest prąd o natężeniu do 4 A. Emitowane z katody w wyniku termoemisji elektrony przyspieszane są w polu elektrycznym wytworzonym pomiędzy katodą **K** a anodą **A**. Do katody przyłożony jest ujemny potencjał **HV** równy 16 kV z zasilacza HV-20. Anoda znajduje się na potencjale masy. Tuż za katodą, pomiędzy katodą i anodą, znajduje się cylinder Wehnelta **W**.



Rys.4. Schemat dyfraktometru RHEED. **K** – wolframowa katoda, **W** – cylinder Wehnelta, **A** – anoda, **HV** – wysokie napięcie, **R** – opór, **S** - magnetyczna soczewka ogniskująca, **C₁**, **C₂**, **C₃** - cewki umożliwiające zmianę kąta oraz miejsca padania na próbkę **P**, **E** - ekran fluorescencyjny.

Wiązka elektronów o energii 16 keV jest ogniskowana przez magnetyczną soczewkę **S**. Cewki odchylające **C₁**, **C₂** i **C₃** umożliwiają zmianę toru wiązki elektronów w płaszczyźnie rysunku oraz prostopadle do niego. Tym samym za pomocą dwu cewek definiowany jest kąt padania wiązki elektronów na próbkę. Trzecia umożliwia zmianę miejsca padania wiązki elektronów na próbkę. Obraz dyfrakcyjny wyświetlany jest na ekranie fluorescencyjnym **E** i zapisywany za pomocą kamery CCD.

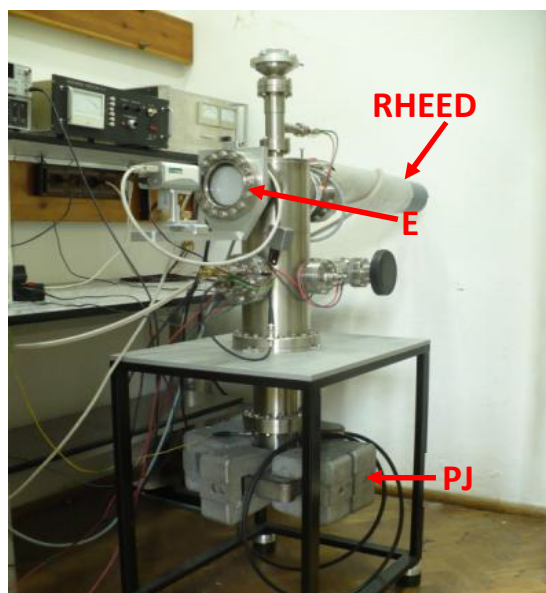
Wykonanie ćwiczenia

1. Wyposażenie stanowiska pomiarowego.
2. Uruchomienie aparatury pomiarowej.
3. Wykonanie pomiarów.
Ustalenie zakresu zmian wartości kątów padania oraz azymutalnego.
Otrzymanie obrazów RHEED i warunki ich rejestracji.
Rejestracja obrazów RHEED przy pomocy kamery CCD.
4. Wyłączenie aparatury pomiarowej.

Wyposażenie stanowiska pomiarowego

Komora UHV wraz z dyfraktometrem RHEED

Komora UHV opisana została w części Informacje wprowadzające w punkcie 5. Dyfraktometr RHEED jest opisany w części Informacje wprowadzające w punkcie 6. Rysunek 5 przedstawia fotografię komory UHV wraz z dyfraktometrem RHEED.



Rys. 5. Fotografia komory UHV wraz z dyfraktometrem RHEED.
E – ekran fluorescencyjny, PJ – pompa jonowa.

Układ kontrolujący ciśnienie w komorze

Zasilacz pompy jonowej: typowe parametry pracy przy ciśnieniu rzędu 10^{-8} mbara: $U=5$ kV, $I < 1 \mu\text{A}$.



Rys. 6. Fotografia zasilacza pompy jonowej. Z – przyciski zakresu prądu jonowego; od lewego do prawego: $250 \mu\text{A}$, $2,5 \text{ mA}$, 25 mA , 250 mA .

Próżniomierz jonizacyjny PJ-8 (kontroler głowicy Bayarda-Alperta)

Głowica Bayarda-Alperta pracuje przy prądzie emisji równym 1 mA .

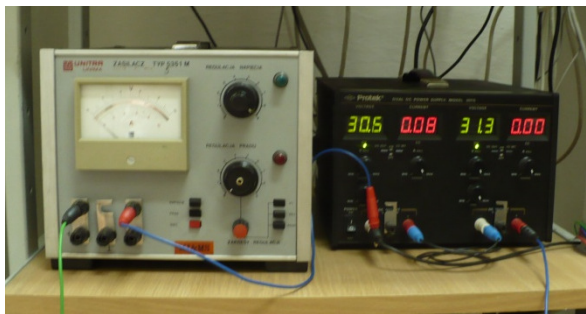


Rys. 7. Fotografia próżniomierza jonizacyjnego PJ-8. Z – przyciski rzędu (zakres) mierzonego ciśnienia, N – wyłącznik chwilowy oraz kontrolka „Nadmiar”, S – wyłącznik sieciowy wraz z kontrolką.

Zasilacz prądowy do oczyszczania próbki

Dwa zasilacze połączone równolegle: typ 5351M oraz 3015. Typowe parametry pracy podczas oczyszczania próbki: $U=60 \text{ V}$, $I=10 \text{ A}$, czas przepuszczania prądu 3 s .

UWAGA! Podczas oczyszczania próbki ciśnienie nie może być wyższe niż $1,0 \cdot 10^{-7}$ mbara. Jeżeli podczas oczyszczania ciśnienie przekracza wartość $1,0 \cdot 10^{-7}$ mbara należy skrócić czas przepływu prądu przez próbkę lub/i natężenie prądu. Przed powtórным oczyszczeniem należy odczekać do momentu, gdy ciśnienie w komorze UHV osiągnie typową wartość. Procedurę oczyszczania powtarzać, aż do otrzymania odpowiedniej jakości obrazu dyfrakcyjnego.



Rys. 8. Fotografia zasilaczy prądowych do oczyszczania próbki Si.

Układ kontrolujący pracę dyfraktometru RHEED

Zasilacz wysokiego napięcia HV-20

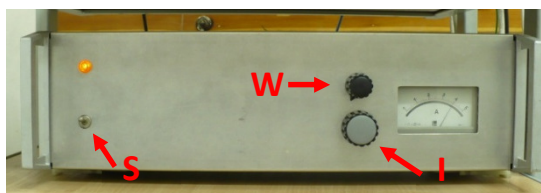
Napięcie pracy $U=16$ keV, maksymalne napięcie $U=20$ keV.



Rys. 9. Fotografia zasilacza wysokiego napięcia HV-20. S – włącznik sieciowy, HV – potencjometry wysokiego napięcia.

Zasilacz katody

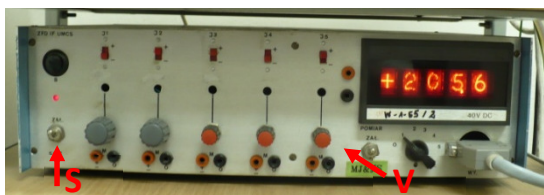
Prąd pracy $I=3,2$ A, maksymalny prąd $I=4,0$ A. Po włączeniu przez katodę płynie prąd o natężeniu około $I=2,0$ A.



Rys. 10. Fotografia zasilacza katody. S – włącznik sieciowy, I – potencjometr regulujący prąd katody, W – potencjometr regulujący potencjał Wehnelta.

Zasilacz cewek

Cewki zasilane są napięciem $U=15$ V; maksymalny prąd płynący przez cewki $I=400$ mA.

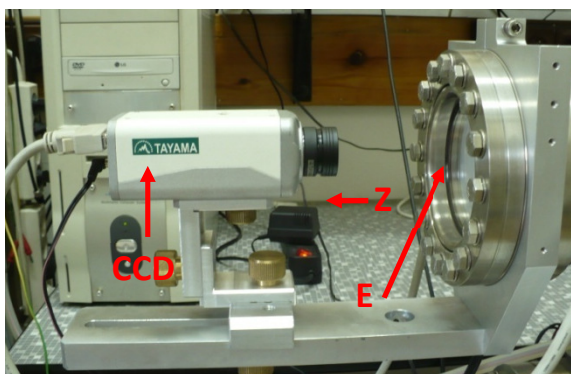


Rys. 11 Fotografia zasilacza cewek. S – włącznik sieciowy, V – potencjometry regulujące prądy cewek.

Układ do rejestracji obrazów dyfrakcyjnych

Kamera CCD Tayama.

Komputer PC.



Rys. 12 Fotografia kamery CCD oraz ekranu fluorescencyjnego (E). Z – listwa zasilająca z podłączonym zasilaczem kamery CCD.

Uruchomienie aparatury pomiarowej

Próżniomierz jonizacyjny PJ-8

- Sprawdzić, czy głowica Bayarda-Alperta jest podłączona do kontrolera.
- Włączyć zakres ciśnienia na wykładnik -4.
- Włączyć zasilanie próżniomierza – przycisk „sieć”.
- Jeżeli wskazania próżniomierza są w okolicy zera, przełączyć na kolejny/kolejne zakres/y mierzonych ciśnień, wykładniki: -5, -6, -7, -8, aż miernik wskaże różną od zera wartość mierzonego ciśnienia.

UWAGA! Gdy ciśnienie w komorze jest wyższe od zakresu włączonego w kontrolerze, automatycznie włącza się czerwona lampka „nadmiar”. Oznacza to automatyczne wyłączenie prądu żarzenia katody głowicy Bayarda-Alperta. W takim przypadku należy zmienić zakres ciśnienia na wykładnik o niższej wartości, np. z -8 na -7 lub -6.

Dyfraktometr RHEED

Wysokie napięcie

- Potencjometr wysokiego napięcia na zasilaczu wysokiego napięcia HV-20 ustawić w pozycji zerowej – skrócić całkowicie w lewo.
- Sprawdzić, czy kabel zasilający katodę działa RHEED jest podłączony do działa.
- Włączyć zasilacz wysokiego napięcia HV-20 – włącznik sieć.
- Ustawić wartość napięcia na 16 kV.

Katoda

- Potencjometr prądu katody na zasilaczu prądowym ustawić w pozycji zerowej – skrócić całkowicie w lewo.
- Włączyć zasilacz prądowy – włącznik sieć; na mierniku natychmiast zostanie wyświetlona minimalna wartość prądu płynącego przez katodę równa około 2 A.
- Ustawić natężenie prądu na wartość około 3,2 A.

Cewki

UWAGA! Przed włączeniem zasilacza cewek **NIE NALEŻY** zmieniać ustawień potencjometrów regulujących prąd cewek.

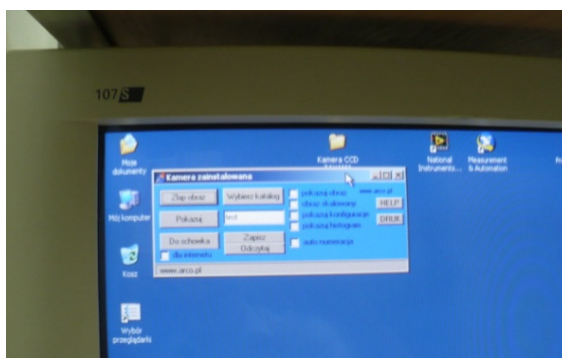
- Włączyć zasilacz cewek – włącznik sieci.

Po wykonaniu tych czynności na ekranie fluorescencyjnym powinien pojawić się obraz dyfrakcyjny powierzchni badanej próbki.

UWAGA! Jeżeli na ekranie widoczna jest tylko jedna, ostra plamka o bardzo dużym natężeniu należy jak najszybciej zmienić kąt padania wiązki elektronów na próbkę poprzez zmianę prądu płynącego przez pierwszą cewkę – pierwszy potencjometr.

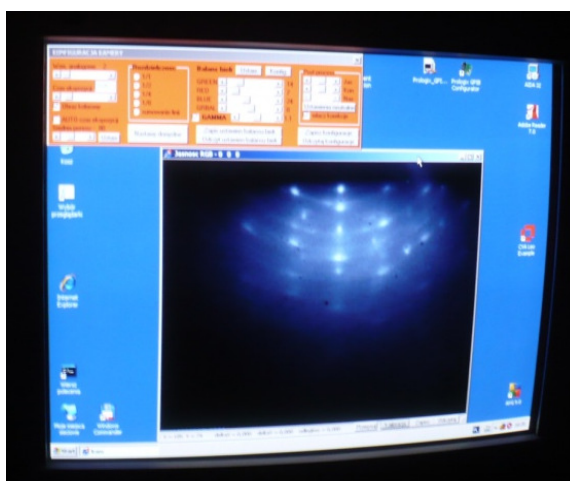
Kamera CCD

- Włączyć zasilanie kamery CCD; listwa zasilająca Z na Rys. 12.
- Włączyć komputer PC oraz uruchomić program „kam” do obsługi kamery CCD. Na ekranie monitora powinno pojawić się okno „Kamera zainstalowana”, Rys. 13.



Rys. 13 Okno, które powinno pojawić się po uruchomieniu programu „kam” do obsługi kamery CCD.

Po kliknięciu na przycisk „pokazuj” powinno otworzyć się okno, w którym będzie wyświetlany obraz rejestrowany aktualnie przez kamerę CCD, Rys. 14. Przycisk „pokazuj konfigurację” umożliwia otworenie okna „konfiguracja kamery”, gdzie można ustawić podstawowe parametry definiujące pracę kamery CCD np.: czas ekspozycji, wzmocnienie analogowe, rozdzielczość i inne. Ustawienia te są dobrane tak, aby umożliwić optymalną rejestrację obrazów i nie powinny być zmieniane.



Rys. 14 Okno przedstawiające obraz rejestrowany przez kamerę CCD (dół) oraz okno „konfiguracja kamery” (górne) umożliwiające zdefiniowanie parametrów pracy kamery.

Wykonanie pomiarów

Ustalenie zakresu zmian wartości kątów padania oraz azymutalnego

- Kąt padania powinien zostać dobrany tak, aby jakość obrazu była jak najlepsza. Oznacza to dużą jasność i ostrość plamek dyfrakcyjnych przy jak najniższym tle.
- Kąt azymutalny ustalić tak, aby obraz dyfrakcyjny był jak najbardziej symetryczny.
- Poprzez zmianę pozycji manipulatora obrotowego odszukać co najmniej dwa kierunki krystalograficzne o wysokiej symetrii.
- Sprawdzić o ile stopni należy obrócić manipulator aby otrzymać dwa różne oraz dwa takie same obrazy dyfrakcyjne.

Otrzymanie obrazów RHEED i warunki ich rejestracji

- Po włączeniu dyfraktometru RHEED na ekranie fluorescencyjnym powinien pojawić się obraz dyfrakcyjny powierzchni badanej próbki.
- Jeżeli obraz jest widoczny lub słabo widoczny na ekranie należy potencjometrami regulującymi prąd cewek ustalić kąt padania tak, aby jakość obrazu była jak najlepsza.

- Jeżeli obraz nie jest widoczny zazwyczaj należy zmienić nieznacznie prąd jednej z cewek. Należy przy tym pamiętać, aby zanotować wcześniejsze wartości prądu płynącego przez cewki.
- Przy ustalonym kącie padania dla każdego kąta azymutalnego należy zarejestrować obraz dyfrakcyjny i zapisać go w pamięci komputera.

Rejestracja obrazów RHEED przy pomocy kamery CCD

Zapis obrazu: w oknie „Kamera zainstalowana” należy wcisnąć przycisk „złap obraz”, wybrać katalog „wybierz katalog” i zapisać obraz „zapisz”.

Wyłączenie aparatury pomiarowej

- Wyłączyć zasilanie kamery CCD – listwa zasilająca.
- Zredukować prąd katody do minimum i wyłączyć zasilacz katody.
- Wyłączyć wysokie napięcie, zasilacz HV-20.
- Wyłączyć zasilacz cewek. UWAGA! Nie zmieniać wartości prądów cewek.
- Wyłączyć zasilacz oczyszczania próbki.
- Wyłączyć próżniomierz jonizacyjny PJ-8.
- Po zapisaniu i skopiowaniu zarejestrowanych danych wyłączyć komputer PC.

Opracowanie wyników

1. Wyznaczenie wartości parametrów sieci odwrotnej.
2. Wyznaczenie wektorów translacji dwuwymiarowej sieci.
3. Określenie typu sieci krystalograficznej.
4. Wyznaczenie stałej sieci Si.
5. Ocena niepewności.

Wyznaczenie wartości parametrów sieci odwrotnej

- Na podstawie położenia granicy cienia oraz plamki zwierciadlane odbitej w obrazach RHEED ustalić kąt padania wiązki elektronów. Przyjąć odległość między ekranem a próbką równą $L=170$ mm.
- Z zerowej strefy Lauego wybrać dwie wyraźne plamki dyfrakcyjne i wyznaczyć dla nich składowe k_x wektora rozpraszania Δk .
- Obliczyć długość wektora $\Delta k_x = k_{x_1} - k_{x_2}$ dla obu kierunków krystalograficznych.

Wyznaczenie wektorów translacji dwuwymiarowej sieci

Na podstawie znajomości wartości wektorów Δk_x dla obu kierunków krystalograficznych wyznaczyć odległości między rzędami atomów w sieci rzeczywistej dla tych kierunków oraz związane z nimi długości wektorów translacji dwuwymiarowej sieci.

Określenie typu sieci krystalograficznej

Na podstawie zarejestrowanych obrazów dyfrakcyjnych w zależności od kąta azymutalnego określić symetrię oraz typ sieci krystalograficznej badanej powierzchni.

Wyznaczenie stałej sieci Si

Na podstawie znajomości wektorów translacji dwuwymiarowej sieci oraz typu sieci krystalograficznej wyznaczyć stałą sieci Si.

Ocena niepewności

Na niepewność wyników pomiarów mają wpływ:

- niepewność wyznaczenia kąta padania θ_i , na którą składa się niepewność wyznaczenia położenia granicy cienia i plamki zwierciadlane odbitej,
- niepewność wyznaczenia kątów ugięcia θ_f oraz padania i ugięcia kąta azymutalnego ϕ_i i ϕ_f obserwowanych plamek dyfrakcyjnych,
- niepewność określenia długości wektora falowego padającej wiązki elektronów.

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno składać się z następujących punktów:

1. **Nagłówek:** imię i nazwisko, data, tytuł ćwiczenia,
2. **Cel** ćwiczenia,
3. **Część** teoretyczna: uwzględnić opis techniki RHEED i konstrukcji Ewalda,
4. **Część** doświadczalna: opis aparatury zawierający odpowiednie schematy, rzeczywiste parametry pracy stosowanych urządzeń, opis przeprowadzonych pomiarów,
5. **Wyniki:** wydrukowane obrazy RHEED (z odwróconym kontrastem),
6. **Analiza** wyników: określenie wektorów sieci odwrotnej, określenie wektorów translacji sieci prostej, określenie typu sieci krystalicznej, wyznaczenie stałej sieci Si,
7. **Porównanie** otrzymanych wyników z danymi literaturowymi,
8. **Wnioski** i podsumowanie,
9. **Literatura.**

Literatura

1. C. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN, 1999.
2. R. Zdyb, *Rozprawa doktorska*, Wydział Matematyki i Fizyki UMCS, Lublin, 1999.
3. J. E. Mahan, K. M. Geib, G. Y. Robinson, R.G. Long, *A review of the geometrical fundamentals of reflection high-energy electron diffraction with application to silicon surfaces*, *J. Vac. Sci. technol.* **A8**, 3692 (1990).
4. V. Acosta, C. L. Cowan, B.J. Graham, *Podstawy fizyki współczesnej*, PWN,