

# **WYZNACZANIE CZUŁOŚCI MASOWEJ REZONATORA KWARCOWEGO W ZAAWANSOWANEJ PRACOWNI FIZYCZNEJ**

**Tomasz Greczyło, Piotr Mazur, Ewa Dębowska, Piotr Wieczorek**  
Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Wrocławski

## **STRESZCZENIE**

Artykuł opisuje doświadczenie studenckie polegające na wyznaczeniu czułości masowej rezonatora kwarcowego w II Pracowni Fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego. Autorzy prezentują stanowisko doświadczalne oraz ilustrują jego działanie przykładowymi wynikami eksperymentalnymi. Dyskutowane są także wady i zalety stanowiska pomiarowego oraz proponowanych zadań doświadczalnych.

## **DETERMINATION OF MASS SENSITIVITY OF CRYSTAL QUARTZ RESONATORS AT STUDENTS LABORATORY**

### **ABSTRACT**

The paper presents experiment in which students determine mass sensitivity of crystal quartz resonator designed to be carried out in Physics Laboratory II at the Institute of Experimental Physics, University of Wrocław. The authors discuss the process of setting up the experiment and the results of measurements obtained within. Advantages and disadvantages of the apparatus are discussed along with descriptions of possible didactical uses.

### **1. WSTĘP**

Cienkie warstwy, z uwagi na szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach techniki, stanowią obiekt badań zarówno podstawowych, jak i technologicznych [1]. Wytwarzanie i pomiar grubości cienkich warstw jest ważnym aspektem tych badań, stąd celem wydaje się umożliwianie studentom fizyki wykonywania zadań doświadczalnych związanych z tymi zagadnieniami. Niniejszy artykuł przedstawia skonstruowany i używany w II Pracowni Fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego zestaw doświadczalny umożliwiający wyzna-

czenie czułości masowej rezonatora kwarcowego. Prezentowane ćwiczenie studenckie umożliwia wytwarzanie i pomiar grubości cienkich warstw NaCl oraz badanie praw rządzących zjawiskiem piezoelektrycznym, leżącym u podstaw działania rezonatora kwarcowego. Podczas zajęć studenci kształtują umiejętności oraz pogłębiają wiedzę o metodach doświadczalnych wykorzystywanych w pracy ośrodka naukowo-badawczego [2]. Wymagane do prawidłowego przeprowadzenia doświadczenia przygotowanie teoretyczne jest dla studentów doskonałym wstępem do

zrozumienia wielu aspektów fizyki ciała stałego [3]. Artykuł opisuje szczegółowo stanowisko pomiarowe i procedurę pomiarową oraz prezentuje otrzymane wyniki wraz z ich interpretacją fizyczną. Autorzy mają nadzieję, że podobne stanowisko pomiarowe będzie mogło być zbudowane i wykorzystane do pomiarów także w innych pracowniach studenckich w kraju i poza jego granicami.

## 2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE

### 2.1. Wytwarzanie cienkich warstw metodą naporowania

Cienkimi warstwami zwykło nazywać się warstwy o grubości od kilku do kilkuset nm, których wybrane własności (np. gęstość, opór właściwy, przenikalność magnetyczna etc.) różnią się zasadniczo od własności litego materiału. Historycznie pierwszą techniką powszechnie stosowaną do wytwarzania takich warstw było naporowywanie w próżni. Technika ta wymaga użycia komory doświadczalnej, w której na skutek odpompowania uzyskuje się koncentrację molekuł gazów resztkowych, przy której średnia długość drogi swobodnej jest rzędu 0,5 m. W procesie naporowywania cienkiej warstwy wyróżnia się następujące etapy [4]:

- wytworzenie atomowego strumienia pary naporowywanej substancji,
- transport atomów (molekuł) od źródła par do podłoża,
- kondensacja pary na powierzchni podłoża i utworzenie cienkiej warstwy.

Atomowy strumień par można otrzymać podgrzewając materiał do naporowania pod ciśnieniem poniżej  $10^{-5}$  Tr. Dostarczana w ten sposób energia jest zużywana na przyrost energii kinetycznej atomów materiału, co w konsekwencji prowadzi do rozerwania ich wiązań w materiale.

Wysokoenergetyczne atomy opuszczają powierzchnię substancji i rozprzestrzeniają się w obszarze o obniżonym ciśnieniu. Jeśli podczas ruchu w obszarze komory doświadczalnej strumień parującej substancji osiągnie podłoże, to na skutek kondensacji na jego powierzchni, utworzy się cienka warstwa. Dla większości metali kondensacja na podłożu o temperaturze pokojowej zachodzi praktycznie bez zjawiska odbicia od podłoża. W momencie spotkania z powierzchnią atomy tracą swoją energię kinetyczną. Proces straty energii trwa pewien czas, w ciągu którego atomy

naparowane poruszają się po powierzchni odrywając się od niej na krótkie chwile, tworząc tzw. gaz dwuwymiarowy przy powierzchni podłoża. W tym czasie niewielka ich ilość ponownie odparowuje z podłoża a inne, w wyniku wzajemnych zderzeń, tworzą skupiska przyłączające kolejne, poruszające się przy powierzchni atomy. W ten sposób powstają zarodki fazy krystalicznej. Zgodnie z teorią termodynamiczną, dla określonych materiałów powierzchni i substancji naporowywanej, w miarę powiększania się zarodków energia swobodna takiego skupiska atomów osiąga wartość minimalną przy określonym rozmiarze zarodka. W procesie tworzenia się warstwy można wyróżnić następujące fazy:

- zarodkowanie,
- koalescencję poszczególnych wysp,
- wzrost do warstwy ciągłej połączonej ze wzrostem ziaren,
- wzrost w kierunku prostopadłym do podłoża i rekrytalizację w miarę powiększania się grubości warstwy.

Proces wzrostu warstw zależy od szeregu czynników i został szczegółowo opisany w literaturze [4] i [5].

### 2.2. Rezonator kwarcowy

Pierre i Jacques Curie zaobserwowali w 1880 roku zjawisko polegające na pojawianiu się różnicy potencjałów na przeciwległych ściankach niektórych kryształów poddawanych ścisnaniu w kierunku prostopadłym lub równoległym do tych ścianek. Dostrzegli oni także efekt odwrotny, pole elektryczne przyłożone do kryształu wywoływało w nim naprężenie [6]. Pierwsze z tych zjawisk nazywamy prostym, a drugie odwrotnym zjawiskiem piezoelektrycznym.

Amplituda drgań płytki piezoelektrycznej jest zależna od częstotliwości i jest największa w warunkach rezonansu mechanicznego. W celu wzbudzenia drgań rezonansowych przykładą się napięcie zmienne wymuszające drgania płytki – w płytce rozchodzą się fale mechaniczne. Dla drgań podłużnych o częstotliwości podstawowej rozchodzących w płytce o grubości  $s_q$  w kierunku podstawy spełniona jest zależność [7],

$$s_q = \frac{\lambda_q}{2}, \quad (2.2.1.)$$

gdzie  $\lambda_q$  jest długością fali podłużnej w płytce. Jeśli pominie się efekty związane z obecnością elektrod na powierzchniach płyt-

ki, równanie 2.2.1. można wyrazić poprzez częstotliwość rezonansową  $f_q$  oraz prędkość rozchodzenia się fali w materiale płytki  $v$  jako

$$s_q \cdot f_q = \frac{v}{2} . \quad (2.2.2.)$$

Zmianę częstotliwości rezonansowej  $df_q$  wynikającą ze zmiany grubości drgającego kryształu o  $ds_q$  można zapisać jako

$$\frac{df_q}{f_q} = -\frac{ds_q}{s_q} , \quad (2.2.3.)$$

Znak „minus” oznacza, że przyrost grubości wywołuje zmniejszenie częstotliwości drgań własnych. W równaniu 2.2.3. zmianę grubości kwarcu można wyrazić poprzez zmianę jego masy – od masy początkowej  $M_q$  do  $M_q + dM$

$$\frac{df_q}{f_q} = -\frac{dM}{M_q} . \quad (2.2.4.)$$

Przyjmując, że zmiana masy jest konsekwencją naporowania cienkiej warstwy o masie  $M_f$  na powierzchnię kryształu, którego początkowa wartość częstotliwości rezonansowej jest równa  $f_c$  otrzymujemy

$$\frac{f_c - f_q}{f_q} = -\frac{M_f}{M_q} . \quad (2.2.5.)$$

Jeśli przez  $m$  oznaczymy gęstość powierzchniową ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) to równanie 2.2.4. możemy zapisać w formie:

$$\frac{f_c - f_q}{f_q} = -\frac{m_f}{m_q} . \quad (2.2.6.)$$

Pamiętając, że gęstość powierzchniową można obliczyć znając gęstość objętościową substancji  $\rho$  oraz grubość naporowanej warstwy  $s_q$  ( $m_q = s_q \cdot \rho_q$ ,  $m_f = s_f \cdot \rho_f$ ) oraz korzystając z (2.2.2.) otrzymujemy

$$m_f = -\frac{(f_c - f_q) \rho_q v_q}{2f_q^2} . \quad (2.2.7.)$$

Stąd wartość zmiany częstotliwości wynikającą z faktu naporowania cienkiej warstwy można określić jako

$$\Delta f = f_c - f_q = -C_f \cdot m_f . \quad (2.2.8.)$$

Zatem zmiana częstotliwości rezonansowej kryształu kwarcu zależy liniowo od gęstości powierzchniowej, a więc i od masy naporowanej substancji – współczynnik proporcjonalności  $C_f = \frac{2f_q^2}{\rho_q v_q}$  jest nazywany czułością

masową rezonatora. Dla kryształu o gęstości  $\rho_q = 2650 \text{ kg}/\text{m}^3$  i prędkości rozchodzenia się fali  $v_q = 3340 \text{ m}/\text{s}$ , czułość masowa rezonatora o częstotliwości drgań własnych 5 MHz przyjmuje wartość  $5,65 \text{ MHz} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ , co oznacza, że zmiana częstotliwości o 1 Hz wywołana zostaje przy gęstości powierzchniowej  $17,7 \cdot 10^{-8} \text{ kg}/\text{m}^2$ . Zatem rezonator kwarcowy może służyć jako niezwykle precyzyjne narzędzie do pomiaru grubości cienkich warstw.

### 2.3. Metoda prążków Fizeau

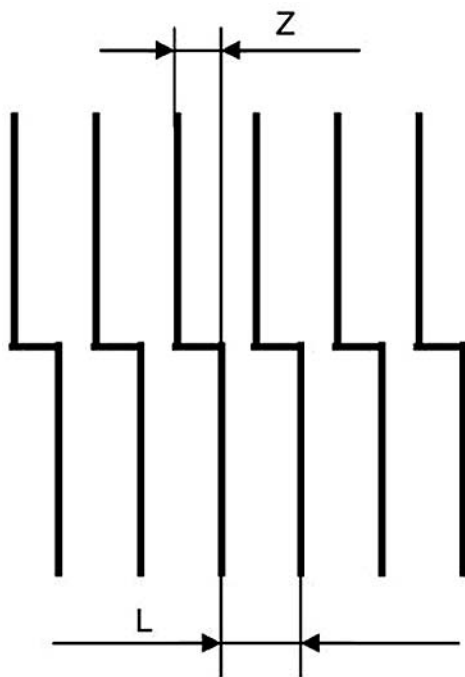
Istnieje szereg optycznych metod wyznaczania grubości cienkich warstw [8]. W niniejszym doświadczeniu wykorzystywana jest metoda prążków Fizeau – jednakowej grubości, w której grubość cienkiej warstwy określa się z przesunięcia prążków interferencyjnych, obserwowanych w mikroskopie interferencyjnym, a powstających po odbiciu światła od powierzchni z uskokiem. Określenie grubości warstwy badanej jest możliwe dzięki następującej procedurze:

- na część powierzchni podłoża (szkła) nanosi się badaną warstwę,
- całą powierzchnię podłoża wraz z warstwą badaną pokrywa się odbijającą warstwą metalu np. srebra lub miedzi,
- do tak przygotowanej płytki przykładana się półprzepuszczalna płytkę odniesienia tworząc klin powietrzny o małym kącie rozwarcia,
- płytki umieszcza się w mikroskopie interferencyjnym, gdzie oświetlane są światłem monochromatycznym,
- mierzy się przesunięcie obserwowanych prążków interferencyjnych równej grubości  $Z$  wynikające z obecności na powierzchni płytki uskoju o wysokości odpowiadającej grubości warstwy badanej – patrz Rysunek 2.3. oraz odległość między prążkami  $L$ .

Korzystając z wyników pomiarów można obliczyć głębokość uskoju [9], czyli grubość badanej warstwy, z zależności:

$$d = \frac{Z}{L} \cdot \frac{\lambda}{2} , \quad (2.3.1.)$$

gdzie  $\lambda$  jest długością fali światła monochromatycznego (dla lampy sodowej 589 nm), którym oświetlano układ.



Rysunek 2.3. Schemat deformacji prążków interferencyjnych z zaznaczonymi wielkościami mierzonymi

### 3. APARATURA POMIAROWA

#### 3.1. Poszczególne elementy

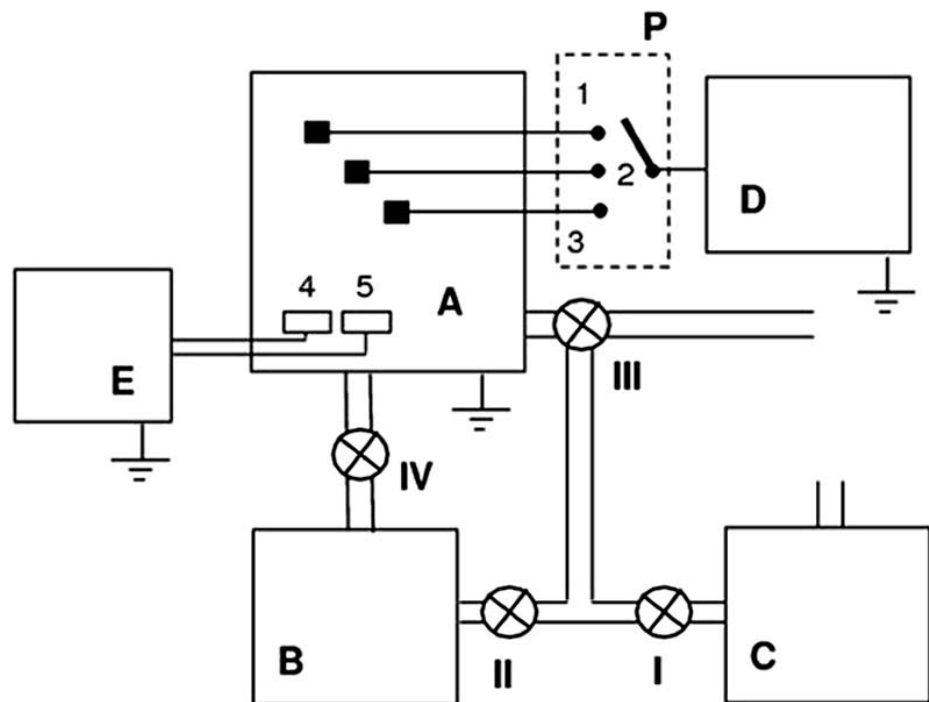
Schemat blokowy układu pomiarowego oraz układu wytwarzającego próżnię w komorze pomiarowej, użytych do realizacji opisywanych zadań doświadczonych przedstawia Rysunek 3.1. Oznaczone na schemacie blokowym stosownymi symbolami elementy to odpowiednio:

- A – próżniowa komora pomiarowa,
- B – pompa dyfuzyjna,
- C – pompa rotacyjna,
- D – częstotliciomierz,
- E – wysokoprądowy, regulowany zasilacz źródeł par NaCl oraz Cu,

- 1 – 3 – badane rezonatory kwarcowe,
- 4 – źródło par NaCl,
- 5 – źródło par Cu,
- I – IV – zawory próżniowe,
- P – przełącznik pomiaru częstotliwości drgań własnych rezonatorów kwarcowych.

#### 3.2. Charakterystyka zestawu

Opisany układ pomiarowy pozwala naporowywać jednocześnie na powierzchnię szkła oraz trzech różniących się częstotliwością drgań własnych rezonatorów kwarcowych cienkie warstwy NaCl. Ponadto możliwe jest naporowywanie na uzyskane na szkle warstwy NaCl kolejnej, nieprzepuszczalnej dla światła widzialnego warstwy Cu, dzięki czemu możliwe jest przeprowadzenie pomiarów grubości odpowiednich warstw metodą prążków Fizeau. Podczas naporowywania NaCl strumień par substancji kierowany jest na częściowo przesłoniętą próbkę szklaną oraz trzy różne rezonatory kwarcowe, których częstotliwości drgań własnych są monitorowane za pomocą częstotliciomierza. Podczas procesu naporowania NaCl w sposób ciągły mierzona jest częstotliwość generatora kwarcowego o częstotliwości drgań własnych około 5 MHz. Po zakończeniu procesu naporowywania, dzięki przełącznikowi P, możliwy jest



Rysunek 3.1. Schemat blokowy układu pomiarowego (opis w tekście)

pomiar zmian częstotliwości drgań własnych pozostałych rezonatorów kwarcowych. Uzyskanie informacji o zmianie częstotliwości drgań własnych badanych rezonatorów oraz pomiar grubości kolejno naporowywanych na próbki szklane warstw pozwala wyznaczyć czułość masową każdego z nich. Rysunek 3.2. prezentuje widok wnętrza komory próżniowej aparatury pomiarowej w II Pracowni Fizycznej IFD UW. Jej najważniejsze elementy to:

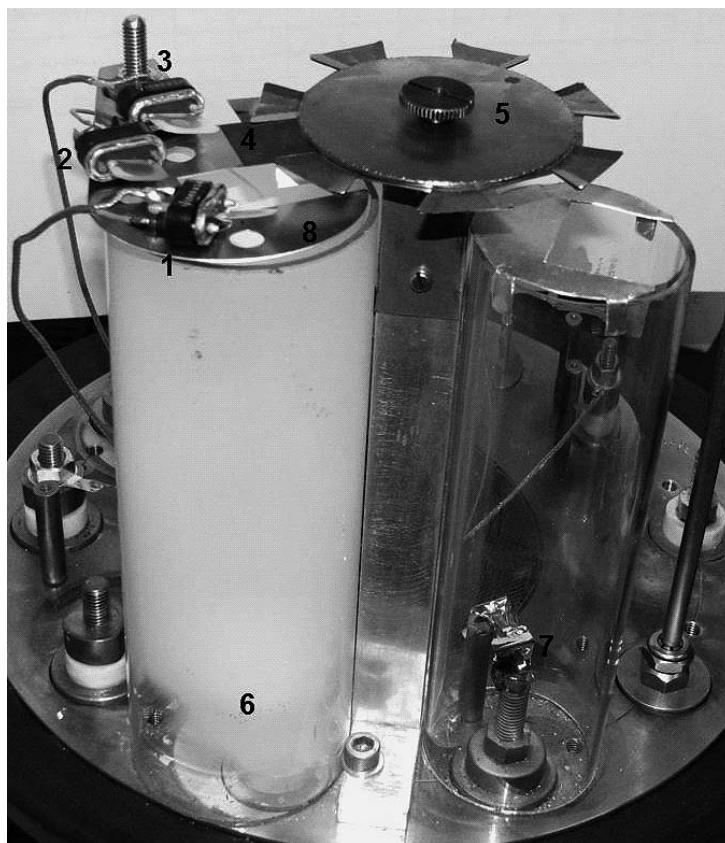
1. rezonator kwarcowy nr 1 o częstotliwości drgań własnych około 3 MHz,
2. rezonator kwarcowy nr 2 o częstotliwości około 5 MHz,
3. rezonator kwarcowy nr 3 o częstotliwości około 7 MHz,
4. płytkę szklaną do optycznych pomiarów grubości naporowanej warstwy NaCl (w części przesłoniętą),
5. uchwyt do mocowania 7 szkieł laboratoryjnych – karuzela pozwalająca przemieszczać próbki znad źródła NaCl nad źródło Cu,
6. cylinder szklany osłaniający źródło par NaCl,
7. łódka wolframowa – źródło par Cu służące do pokrywania naporowanych NaCl szkieł laboratoryjnych warstwą Cu,
8. przesłona z otworami o średnicy 7 mm wraz z mocowaniami rezonatorów.

#### 4. TEMATYKA DOŚWIADCZENIA I PROCEDURA POMIAROWA

##### 4.1. Cele doświadczenia

Celem doświadczenia jest praktyczne zaznajomienie studentów ze sposobami wytwarzania cienkich warstw oraz metodami pomiaru ich grubości. Jednocześnie studenci poznają prawa rządzące zjawiskiem piezoelektrycznym oraz doświadczalnie wyznaczają czułość masową trzech różnych rezonatorów kwarcowych. Ćwiczenie studenckie składa się z kilku etapów:

- zaplanowanie doświadczenia oraz przygotowanie stanowiska pomiarowego,
- uzyskanie próżni o parametrach umożliwiających pomiary,
- jednoczesne naporowanie cienkich warstw



Rysunek 3.2. Widok wnętrza komory próżniowej (opis w tekście)

- NaCl na każdy z rezonatorów kwarcowych oraz w połowie przysłoniętą próbkę szklaną,
- pokrycie próbki szklanej metaliczną, nieprzepuszczalną dla światła widzialnego, warstwą miedzi,
- pomiar grubości naporowanych warstw metodą prążków Fizeau,
- wyznaczenie czułości masowej wykorzystywanych w doświadczeniu rezonatorów kwarcowych.

##### 4.2. Procedura pomiarowa

Przed zamknięciem komory próżniowej studenci umieszczają w uchwytach 5 szkiełek laboratoryjnych o rozmiarach 20 x 20 x 0,1mm oraz wypełniają źródła (wolframowe łódki) kryształami NaCl i kawałkami drutu miedzianego.

Po odparowaniu komory pomiarowej do ciśnienia rzędu  $10^{-5}$  Tr przełącznik P ustawiany jest w położeniu 2, by możliwe było monitorowanie zmian częstotliwości drgań rezonatora kwarcowego nr 2, podczas procesu naporowywania NaCl. W celu odparowania z łódki wolframowej NaCl przepuszczany jest

przez nią prąd elektryczny o natężeniu regulowanym przez eksperymentatora. Ilość dostarczanej w ten sposób do źródła NaCl energii kontrolowana jest manualnie poprzez zmianę napięcia zasilania łódki tak, by szybkość naporowywania nie przekraczała odpowiadającej jej szybkości zmian częstotliwości rzędu 30Hz/s. Pierwsze naporowywanie kończy się, gdy zmiana częstotliwości rezonatora nr 2 wynosi około 1000 Hz. Następnie nad źródłem par NaCl umieszcza się kolejne szkiełko laboratoryjne i powtarza proces do momentu uzyskania zmiany częstotliwości rezonatora kwarcowego nr 2 o 1500 Hz. Pojemność źródła par NaCl pozwala na dokonanie kolejnej serii pomiarowej dla zmiany częstotliwości o 2000 Hz. Po trzeciej serii pomiaru niezbędne jest otwarcie aparatury pomiarowej i uzupełnienie źródła NaCl, by możliwe było przeprowadzenie dwóch kolejnych naporowań odpowiadających zmianom częstotliwości drgań rezonatora kwarcowego o odpowiednio 2500 i 3000 Hz. Po każdej serii pomiarowej, dzięki przełącznikowi P, mierzona jest także wartość zmian częstotliwości drgań własnych dwóch pozostałych rezonatorów nr 1 i 3.

W kolejnej części doświadczenia studenci pokrywają szklane próbki naporowane warstwami NaCl o różnej grubości odbijającą warstwą Cu. W tym celu próbkę umieszcza się nad źródłem par Cu, przez wolframową łódkę przepuszcza prąd elektryczny i naporowuje tak, by utworzona została na całej jej powierzchni, nieprzepuszczalna dla światła widzialnego, warstwa miedzi. Proces naporowywania kontrolowany jest manualnie a grubość warstwy określa się obserwując proces osadzania Cu na kolejnych szkiełkach pomiarowych przez okno szklane w aparaturze próżniowej. W ten sposób otrzymuje się 5 przygotowanych do pomiarów interferencyjnych próbek z uskokiem o różnej – odpowiadającej kolejnym zmianom częstotliwości drgań generatora kwarcowego, grubości warstwy NaCl.

Dla każdej z próbek wykonano 3 niezależne pomiary grubości metodą Fizeau. Tabela

4.1. prezentuje wyniki pomiarów optycznych grubości warstw NaCl wraz z ich niepewnościami standardowymi.

Tabela 4.1. Zestawienie wyników pomiarów optycznych

$\Delta f$ Hz	$d_{sr}$	$u(d)$
	$\times 10^9 m$	
1000	149	28
1500	209	10
2000	258	8
2500	360	14
3000	443	24

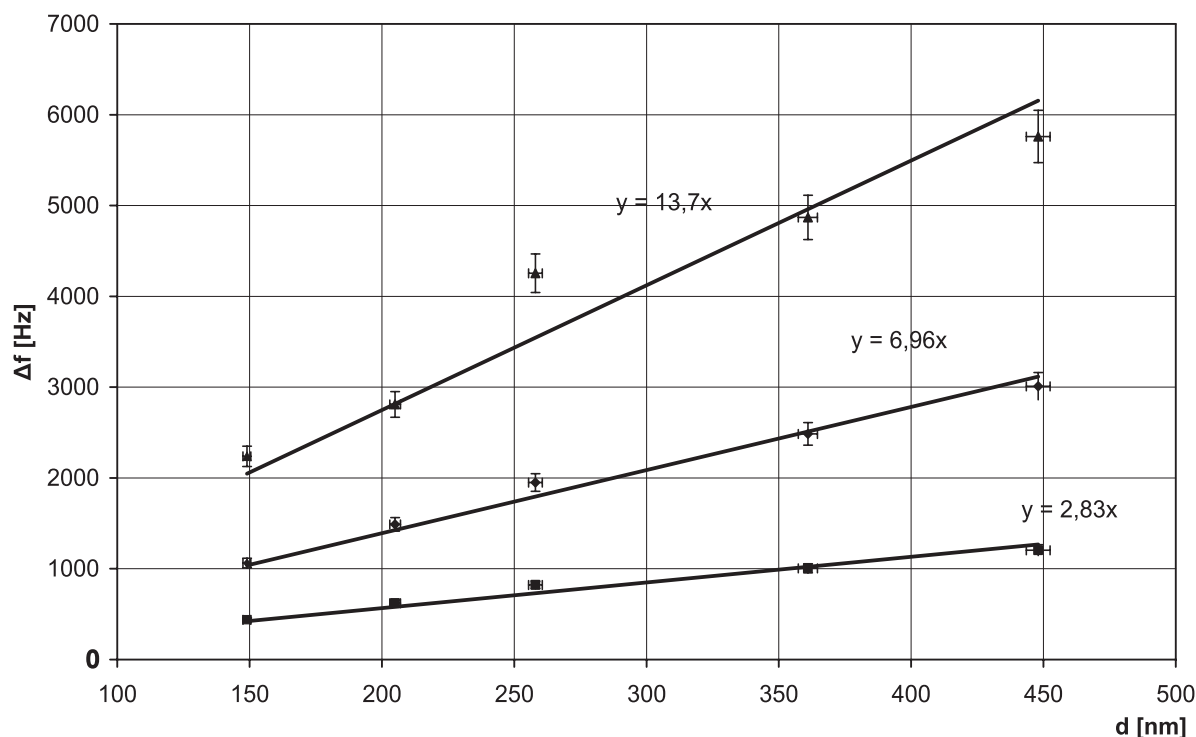
## 5. WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI

Jak wynika z rozważań teoretycznych przedstawionych w części 2.2 niniejszej pracy, rejestracja zmian częstotliwości drgań własnych rezonatorów kwarcowych oraz odpowiadających im grubości naporowanych warstw NaCl pozwala na wyznaczenie czułości masowej poszczególnych rezonatorów. W tym celu niezbędna jest także znajomość średniej gęstości naporowywanej substancji. Należy zaznaczyć, że średnia gęstość cienkiej warstwy, ze względu na jej dwuwymiarowy charakter, może znacząco odbiegać od gęstości objętościowej, zatem w prezentowanym doświadczeniu przyjmuje się, że jest ona równa  $\rho = (2160 \pm 100) \text{ kg/m}^3$ .

Wykres 5.1 przedstawia zależności zmiany częstotliwości drgań własnych poszczególnych rezonatorów od grubości naporowanych warstw. Współczynniki kierunkowe prostych najlepszego dopasowania do punktów pomiarowych  $a$  wraz z ich niepewnościami standardowymi  $u(a)$  oraz wyznaczone z ich wykorzystaniem wartości czułości masowych poszczególnych rezonatorów kwarcowych  $C_f$  wraz z ich złożonymi niepewnościami standardowymi  $u_c(C_f)$  prezentowane są w Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Zestawienie wyników obliczeń

rezonator	$a$	$u(a)$	$C_f$	$u_c(C_f)$
	$\times 10^9 \text{ Hz/m}$		$\times 10^6 \text{ Hz}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$	
1	2,83	0,21	1,31	0,11
2	6,96	0,36	3,22	0,22
3	13,7	1,6	6,34	0,80



Rysunek 5.1. Zmiany częstotliwości drgań własnych rezonatorów kwarcowych  $\Delta f$  w funkcji grubości  $d$  naporowanej warstwy NaCl dla trzech różnych rezonatorów

Otrzymane doświadczalnie wartości czułości masowej stosowanych w doświadczeniu rezonatorów kwarcowych są zaniżone ze względu na zastosowanie przesłony ograniczającej powierzchnię naporowywaną rezonatorów. Obserwowana jest jednak wyraźna tendencja wzrostu czułości generatora wraz ze wzrostem częstotliwości drgań własnych, co jest niepodważalną wartością dydaktyczną układu. Tego rodzaju wyniki eksperymentalne są analizowane i prezentowane przez studentów w postaci sprawozdania z wykonania ćwiczenia.

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony powyżej układ pomiarowy umożliwia doświadczalne wyznaczenie czułości masowej rezonatorów kwarcowych o różnych częstotliwościach drgań własnych. Otrzymane w wyniku realizacji doświadczenia wyniki pozostają w zgodzie z przewidywaniami teoretycznymi.

Do trudności podczas przygotowywania prezentowanego doświadczenia studenckiego należy zaliczyć:

- potrzebę prowadzenia pomiarów w warunkach próżni, ale o parametrach nie wymagających kosztownej aparatury próżniowej,

- pomiar sygnałów o stosunkowo dużej częstotliwości z dokładnością do pojedynczych herców.

Dalsze prace nad poprawą jakości zestawu doświadczalnego winny uwzględnić zwiększenie możliwej do odparowania ilości NaCl bez zapowietrzania aparatury pomiarowej, co przyczyniłoby się do zwiększenia liczby punktów pomiarowych.

Otrzymywane wyniki eksperymentalne są niezwykle kształtujące i ilustrują wykorzystanie rezonatora kwarcowego jako narzędzia pomiarowego dla wyznaczenia grubości cienkiej warstwy. Autorzy mają nadzieję, że sposób prezentacji stanowiska pomiarowego oraz zaprezentowane wyniki doświadczalne umożliwią wykonanie podobnego stanowiska pomiarowego w pracowni studenckiej innych ośrodków dydaktycznych w kraju. Wykorzystanie NaCl jako substancji naporowywanej, a jednocześnie niezwykle łatwo usuwalnej z powierzchni rezonatorów kwarcowych oraz komory pomiarowej sprawia, że układ pomiarowy jest idealny do zastosowań dydaktycznych – wielokrotnego powtarzania pomiarów. Ogromne znaczenie praktyczne ma także fakt, że prężność par NaCl osiąga wartość rzędu  $10^{-4}$  Tr stosunkowo niskiej temperaturze (800 K), podczas gdy temperatura topnienia to 1074 K.

Autorzy sądzą, że prezentowane stanowisko doświadczalne jest użytecznym narzędziem w zaawansowanej pracowni fizycznej, a jego wykorzystanie pozwala doskonalić umiejętności eksperymentatorskie niezbędne w pracy fizyka.

#### LITERATURA

- [1] Ohring M.: *The Materials Science of Thin Films*, Academic Press, San Diego 2002.
- [2] Greczyło T., Dębowska E.: *Spektroskopia elektronów Augera w zaawansowanej pracowni fizycznej, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna*, tom XIII nr 1, (2008), 35-44.
- [3] Kittel Ch.: *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [4] Romanowski W. red.: *Cienkie warstwy metaliczne*, PWN, Warszawa 1974.
- [5] Wesołowska C. red.: *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki cienkich warstw*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975.
- [6] Shaul Katzir, *The Beginnings of Piezoelectricity: A Study in Mundane Physics*, Springer, Dordrecht 2006.
- [7] Lu C., Czanderna A.W.: *Applications of piezoelectric quartz crystal microbalances*, vol. 7 of *Methods and Phenomena Their Applications in Science and Technology*, Elsevier 1984.
- [8] Oleś A.: *Metody doświadczalne fizyki ciała stałego*, WNT, Warszawa 1999.
- [9] *Mikroskop interferencyjny do pomiaru grubości cienkich warstw – instrukcja obsługi*, Zakład Optyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.