

Paweł Grabiński  
Rok 3, Fizyka teoretyczna

# Doświadczenie Franka-Hertza

## 1 Wyniki

Energia wbudzenia dla atomu rtęci wynosi:  $E_{ex} = (4.78 \pm 0.11) \text{ eV}$

## 2 Tabela pomiarowa

Pomiary<sup>1</sup> przez nas zebrane:

$T [^{\circ}\text{C}]$	$U_1 [\text{V}]$	$U_2 [\text{V}]$	$U_{12} [\text{V}]$	$U_{res} [\text{V}]$
67	1.95	6.8	4.85	0.5
67	2.15	6.7	4.55	2.
67	2.35	6.5	4.15	2.5
67	2.	6.8	4.8	1.
72	2.05	6.8	4.75	1.5
72	2.1	6.7	4.6	2.
72	2.25	6.55	4.3	2.5
72	1.85	6.8	4.95	0.5
72	1.9	6.85	4.945	1.
78	1.95	6.8	4.85	1.5
78	1.9	6.8	4.9	1.5
78	1.8	6.8	5.	0.5
78	1.85	6.85	5.	1.
78	1.95	6.75	4.8	2.
83	2.1	6.65	4.55	2.5
83	1.75	6.8	5.05	0.5
83	1.75	6.85	5.1	1.
83	1.85	6.8	4.95	1.5
83	1.9	6.75	4.85	2.
83	2.	6.7	4.7	2.5

---

<sup>1</sup>Dane zostały przedstawione w postaci wykresów i dołączone jako załącznik

---

## 3 Opis teoretyczny

### 3.1 Serie widmowe

Badając widma atomowe zauważono, że są one dyskretne i tworzą linie spektralne. Kolejnym istotnym spostrzeżeniem było, że nie są one położone chaotycznie, lecz układają się w grupy - serie spektralne. Każda z serii widmowych ma jeden stan kwantowy jako stan końcowy atomu. Dla wodoru Balmer pokazał, że prawdziwa jest zależność:

$$\lambda = \lambda_0 - \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (1)$$

Gdzie  $\lambda_0$  – stała,  $n$  – liczba całkowita, przebiegająca znaczenia 3,4,5 itd. W spektroskopii najczęściej najczęściej posługujemy się częstotliwością fali:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Przekształcając wyrażenie (1) otrzymamy:

$$\nu = Rc \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (2)$$

Teraz dla dowolnej serii mamy wzór Balmera:

$$\nu = Rc \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (3)$$

Teraz w zależności od  $m$  poszczególne serie nazywamy:

- Seria Lymana (ultrafiolet):  $m = 1$
- Seria Balmera:  $m = 2$
- Seria Paschena (podczerwień):  $m = 3$
- Seria Pfunda:  $m = 4$
- Seria Humphreysa:  $m = 5$

Jako komentarz historyczny można dodać, że Balmer nie był fizykiem, a numerologiem. Powyższą prawidłowość otrzymał na podstawie danych, które otrzymał na znajomego fizyka.

### 3.2 Model wektorowy atomu

Atom rtęci ma 80 elektronów, w tym 2 walencyjne. Model wektorowy atomu rtęci zbudowany jest z dwóch par wektorów: orbitalnego momentu pędu  $\vec{l}_i$  i spinowego momentu pędu  $\vec{s}_i$ . Wartości tych wektorów wyrażają się jako :

$$|l| = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad |s| = \hbar \sqrt{s(s+1)}.$$

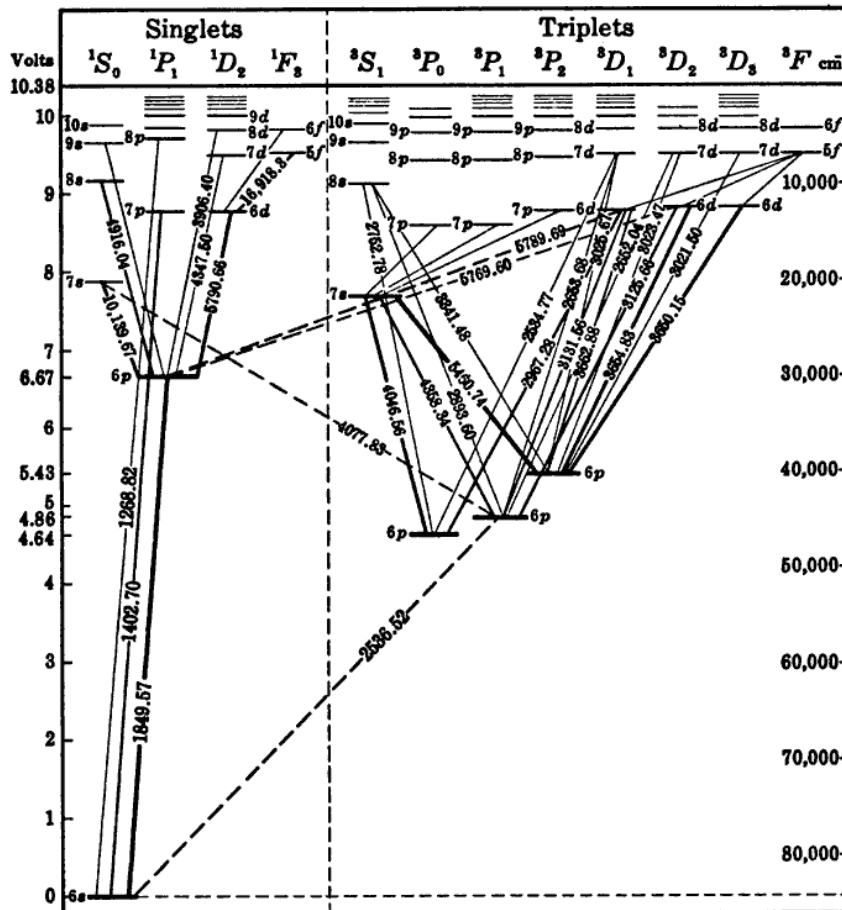
Ponieważ nie można jednoznacznie zdefiniować wartości wektora w danym kierunku, to posługujemy się rzutami na te kierunki, co umożliwi sumowanie. Całkowity wektor momentu pędu  $\vec{J}$  jest stały:

$$|J| = \hbar \sqrt{j(j+1)}, \quad j = l + s, l + s - 1, \dots, |l - s|.$$

Od liczb kwantowych  $l$  i  $s$  zależą dyskretne poziomy atomowe i możliwe przejścia z jednego poziomu na drugi.

### 3.3 Diagram Grotriana dla rtęci

Przedstawienie degeneracji poziomów energetycznych elektronów w atomie. Dozwolone przejścia zaznaczone są liniami. Diagram ma podwójną skalę. Po lewej mamy potencjał wzbudzący wyrażonych w voltach, a po prawej długość fali odpowiadającej fotonowi emitowanemu lub absorbowanemu przy przejściu.



Rysunek 1: Diagram Grotriana dla Hg

### 3.3.1 Zasady wyboru

Nie każde przejście elektronu w atomie jest dozwolone. Niektóre wymagają specjalnych zjawisk wymiany, jak na przykład wymiana elektronów o przeciwnych spinach przez atomy w wyniku zderzenia i przejście pomiędzy stanami singletowymi i tripletowymi. Dla atomu rtęci najbardziej możliwym z przejść jest przejście odpowiadające absorpcji lub emisji fotonu o energii **4.9 eV**.

### 3.4 Linie rezonansowe

Linia rezonansowa to linia spektralna związana z przejściami elektronu pomiędzy stanem podstawowym i pierwszym stanem wzbudzonym (rezonansowym) z wymianą fotonu  $h\nu$ . Dla atomu rtęci możemy przedstawić ten proces jako:

$$h\nu = E_n - E_m = 4.9 \text{ eV} \Rightarrow \lambda = 253.5 \text{ nm} = 2535 \text{ \AA}$$

---

### 3.5 Rodzaje zderzeń elektronów z atomem. Efekt Ramsauera, przekrój czynny na zderzenia

W zderzeniach elektronu z atomem rozróżniamy zderzenia sprężyste i niesprężyste (I i II rodzaju/0).

#### 3.5.1 Zderzenia sprężyste

W zderzeniach sprężystych zachowane są wartości energii i pędu, ale zmieniony jest kierunek ruchu. Zachodzą głównie, gdy elektron ma energię niższą niż energia wzbudzenia atomu.

#### 3.5.2 Zderzenia niesprężyste

Zderzenia niesprężyste odbywają się z wymianą energii.

- I rodzaju - elektron oddaje swoją energię wzbudzając atom
- II rodzaju - atom przechodząc do stanu podstawowego oddaje energię elektronowi

#### 3.5.3 Efekt Ramsauera

Naturalnym jest, że rozpraszając elektrony na atomie oczekujemy, że przekrój czynny maleje z prędkością elektronów. I przeciwnie, oczekujemy, że gdy prędkość maleje, to przekrój czynny będzie wzrastać. Jednak do pewnego momentu, gdy elektrony będą tak niską energią kinetyczną, że nie będzie dochodziło do rozpraszania. Zjawisko to nazywamy efekt Ramsauera.

### 3.6 Pomiar potencjału wzbudzenia i jonizacji

Przejściu ze stanu wzbudzonego(rezonansowego) do stanu podstawowego atomu rtęci towarzyszy emisja fotonu o długości fali  $\lambda = 2535 \text{ \AA}$ . Zmierzyć potencjał wzbudzenia atomu rtęci możemy w następująco: do uzyskania promieniowania o wspomnianej długości fali używa się lampy rtęciowej w tak dobranym polu magnetycznym, żeby łuk rtęciowy odgięty przez to pole przebiegał bezpośrednio przy kwarcowej ściance lampy. Za pomocą specjalnego filtru barwnego przepuszczającego tylko fale o długości krótszej niż  $3000 \text{ \AA}$  soczewką kwarcową skupiamy światło lampy rtęciowej na tzw. lampie rezonansowej. Para rtęci w kuli znajdującej się za lampą, filtrem i soczewką naświetlona jest światłem monochromatycznym o danej rezonansowej długości, co prowadzi do wzbudzenia atomów pary. Stan wzbudzony nie jest trwały - po  $10^8 \text{ s}$  atom przechodzi do stanu podstawowego emitując przy tym foton o tej samej długości fali. Lampa rezonansowa powinna więc wysyłać we wszystkie kierunki promieniowanie, odpowiadające wspomnianemu przejściu, można obserwować na ekranie fluoryzującym. Jeżeli umieścimy pomiędzy lampą a ekranem parę rtęci, to zaobserwujemy na ekranie cień - fotony są absorbowane przez atomy pary.

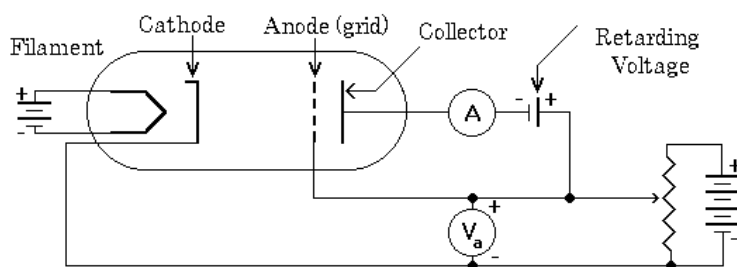
### 3.7 Doświadczenie Francka-Hertza

Układ pomiarowy składa się z:

- katody będącej źródłem wiązki elektronów (Filament),
- dwóch siatek, których napięcie możemy kontrolować, służących do rozpędzania elektronów (Cathode i Anode(grid)),
- anody, zbierającej elektrony, z możliwością pomiaru natężenia prądu (Collector),

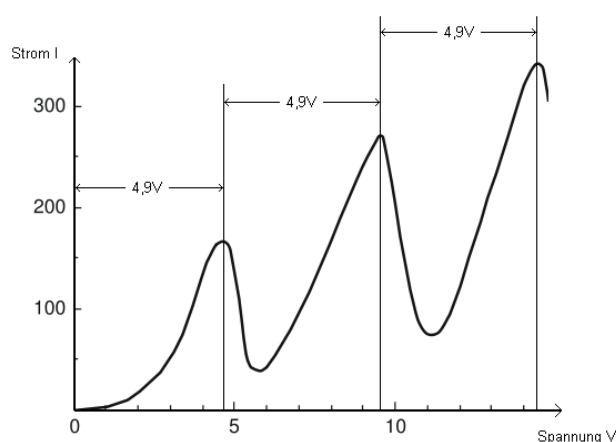
- szklanej komory próżniowej zawierającej naparowaną rtęć.

Elektrony generowane przez katodę trafiają do obszaru pomiędzy siatkami, gdzie są przyspieszane przez pole elektryczne. W obszarze tym również znajduje się para rtęci. Elektrony mogą zderzać się z atomami. Gdy osiągną odpowiednią energię, może dojść do zderzenia niesprężystego i przekazania energii od elektronu do atomu. Dalej elektron może być ponownie przyspieszony do odpowiedniej energii i ponownie wzbudzić atom. Po przekroczeniu drugiej siatki, elektrony wpadają w obszar potencjału progowego, do którego pokonania potrzebują odpowiedniej energii.



Rysunek 2: Układ pomiarowy doświadczenia Franka-Hertza

### 3.8 Interpretacja wyników



Rysunek 3: Przykładowy wykres danych zmierzonych w doświadczeniu Francka-Hertza

Widzimy wielokrotne maksima i minima prądu anodowego w zależności od przyłożonego napięcia przyspieszającego. Maksima pojawiają się w okolicach  $4.9\text{V}$ . Jest to sytuacja, gdy elektronom brakuje energii, by wzbudzić atomy rtęci. Natomiast minima odpowiadają napięciom  $4.9\text{V} + U_{res}$ , gdzie elektrony mają energię wystarczającą, by wzbudzić atom, ale niewystarczającą, by pokonać potencjał zaporowy. Isotną obserwacją jest fakt występowania minimów i maksimów co stałą wartość, co dowodzi hipotezy dyskretnych poziomów energetycznych.

---

## 4 Opis doświadczenia

Pierwszą czynnością naszego eksperymentu jest podniesienie temperatury układu do temperatury początkowej  $65^{\circ}\text{C}$ . Po dojściu układu do równowagi termicznej, możemy przystąpić do pomiarów. Dla każdej badanej temperatury ( $T \in \{65^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}, 75^{\circ}\text{C}, 80^{\circ}\text{C}\}$ ), za pomocą układu pomiarowego połączanego z komputerem, mierzymy natężenia prądu anodowego w zależności od napięcia przyspieszającego. Pomiary wykonujemy dla 5 różnych wartości napięcia progowego  $U_{res} \in \{0.5\text{V}, 1\text{V}, 1.5\text{V}, 2\text{V}, 2.5\text{V}\}$ .

## 5 Obliczenia

Wartości potencjału wzbudzenia atomu rtęci będziemy wyznaczać z różnic pomiędzy kolejnymi maksimami prądu anodowego. Patrząc na wykresy widzimy, że pierwsze oraz drugie maksimum zachowują się dobrze niezależnie od pomiaru, jednak dalsze maksimum często mają duże zakłócenia lub są nieodróżnialne od szumu. Dlatego liczymy różnice pomiędzy pierwszym i drugimi maksimami dla wszystkich 20 zestawów danych (wyniki znaleźć można w Tabeli Pomiarowej 2). Dalej liczymy średnią arytmetyczną tych wyników i dostajemy wynik:

$$U_{ex} = 4.7825\text{V}$$

Czyli energia wzbudzenia atomu rtęci, to:

$$E_{ex} = 4.7825\text{eV} \quad (4)$$

## 6 Niepewności pomiarów

Niepewność pomiarową możemy uzyskać ze wzoru:

$$\Delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{2\sqrt{N}}$$

W naszym przypadku wynosi to:

$$\Delta U = \frac{5.1 - 4.15}{2\sqrt{20}} = 0.106213 \approx 0.11$$

Niepewność naszego pomiaru, to  $\Delta U = 0.11\text{V}$ .

## 7 Wnioski

Wartość tabelaryczna energii wzbudzenia dla atomu rtęci to  $4.9\text{eV}$ .

W naszych pomiarach otrzymaliśmy  $E_{ex} = (4.78 \pm 0.11)\text{eV}$ . Widzimy, że jest to wartość bardzo zbliżona.

Jednak sama wartość energii wzbudzenia jest tylko pobocznym wnioskiem doświadczenia. Najistotniejszą obserwacją jest powtarzanie się maksimów, co stałą wartość potencjału przyspieszającego. Do tej obserwacji najlepsze są pomiary przy niskich napięciach oporowych i wysokich temperaturach. Na wykresach odpowiadających tym warunkom możemy zauważyć nawet 4 wyraźne maksima.

---

Wyniki stają się mniej czytelne przy dużych napięciach oporowych. By potwierdzić hipotezę dyskretnych poziomów energii najlepiej badać  $0.5 - 1.5\text{V}$  potencjału progowego.

Ciekawe zjawisko możemy zauważyć przy dużych temperaturach oraz dużych napięciach oporowych. Gdy przyłożymy duże napięcie przyspieszające, prąd anodowy zmienia kierunek i płynie w drugą stronę. Z powodu dużego ciśnienia przekrój czynny jest wysoki i żaden elektron z katody nie jest w stanie pokonać progu potencjału. Natomiast napięcie pomiędzy siatką, a anodą jest takie duże, że następuje przepływ elektornów z anody do siatki.

## Literatura

- [1] K. Sierański, K. Jezierski, B. Kołodka, Wzory i prawa z objaśnieniami, cz. I, Oficyna Wydawnicza Scripta, Wrocław 2005
- [2] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, t.3
- [3] T. Szymczyk, Tablice matematyczne, fizyczne, astronomiczne i chemiczne, PPU "PARK", Bielsko-Biała 2002

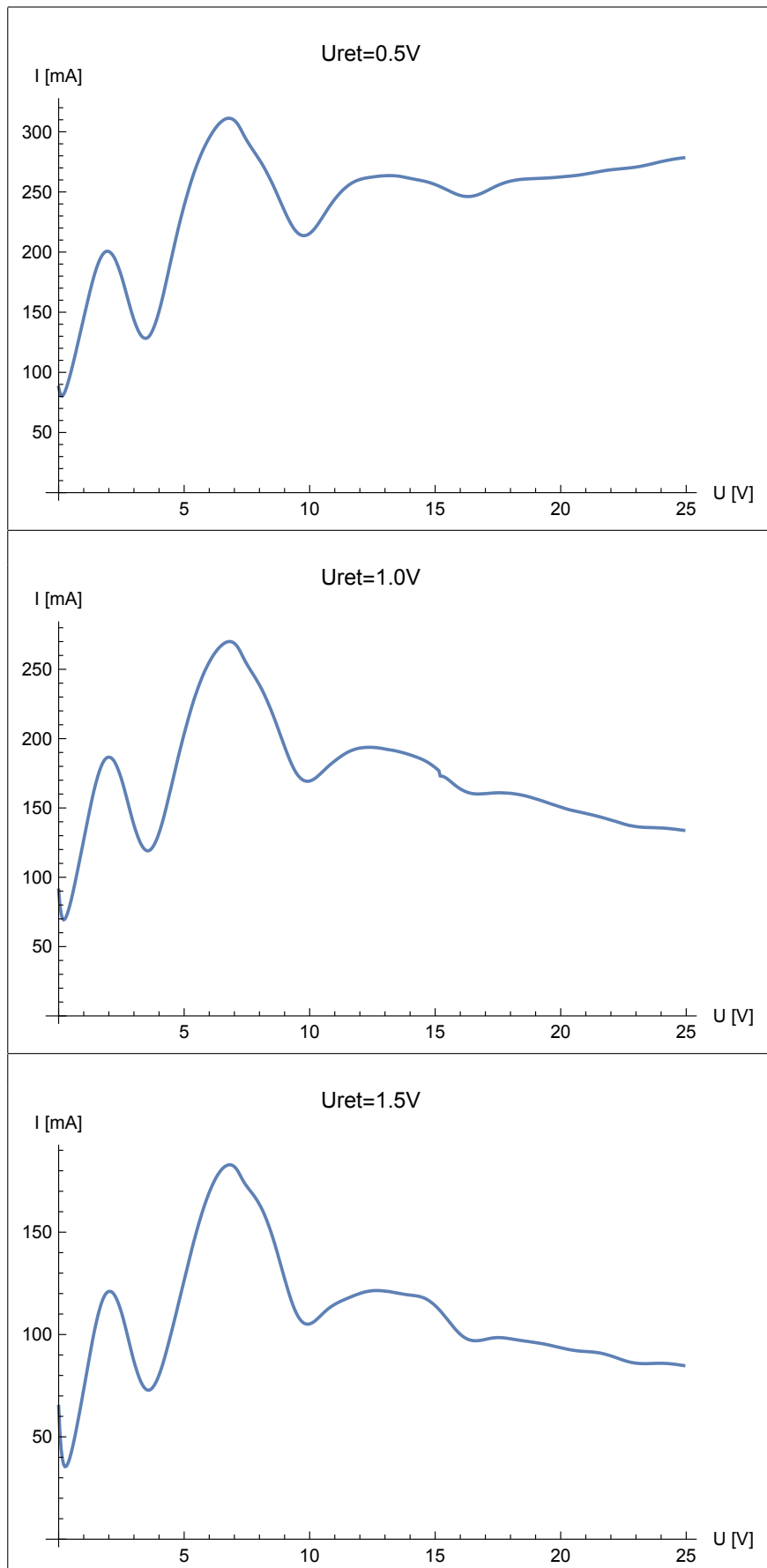
---

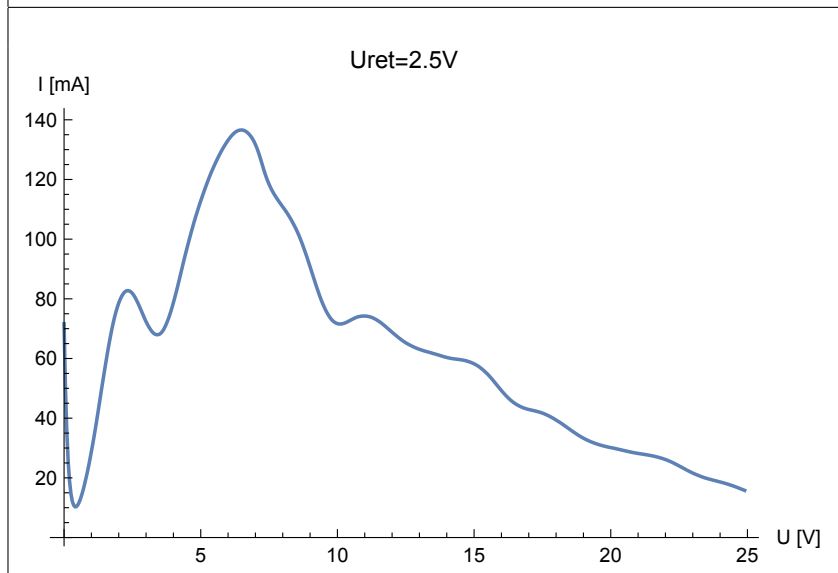
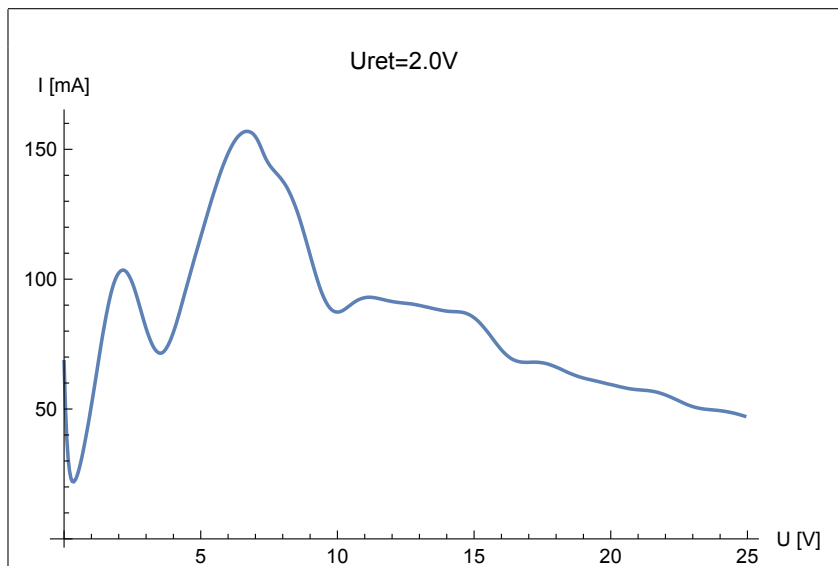
---



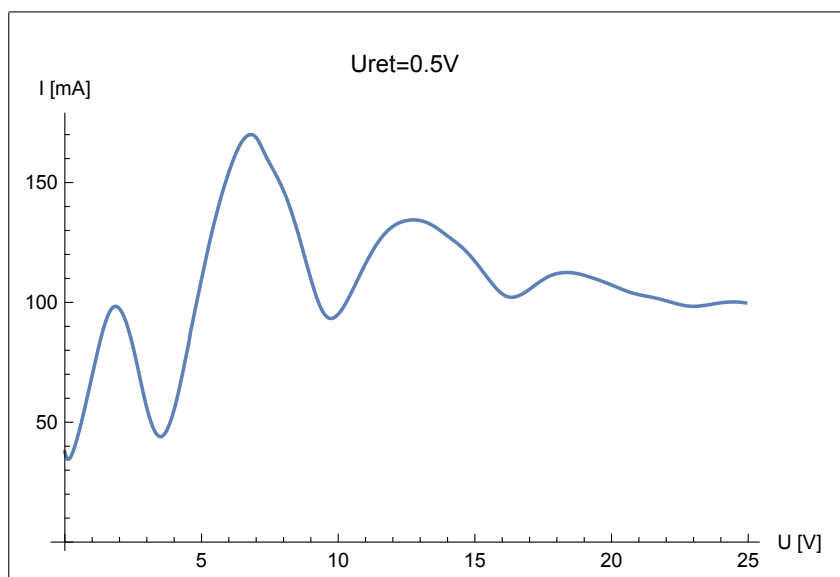
## 8 Wykresy

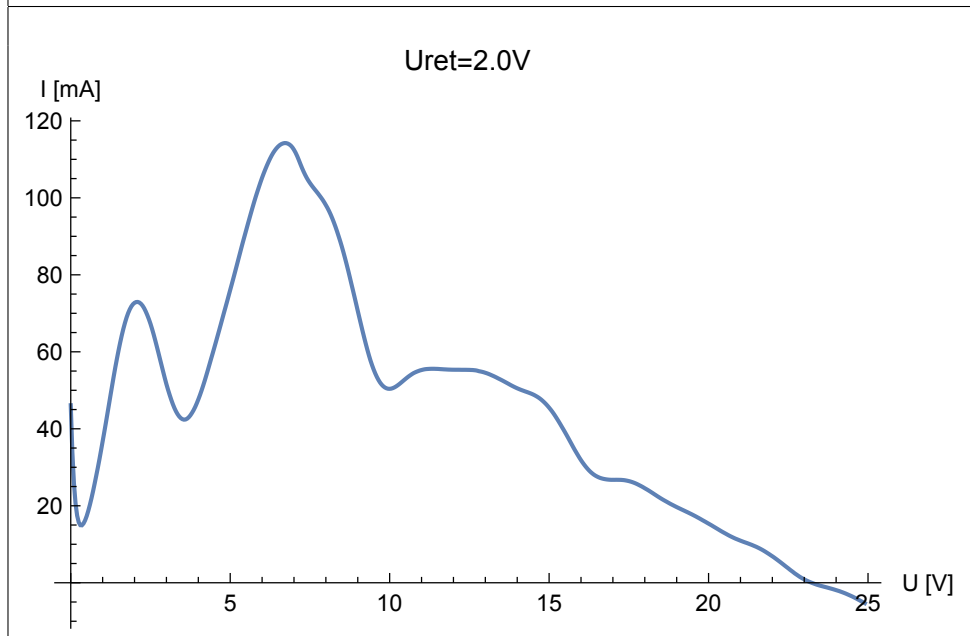
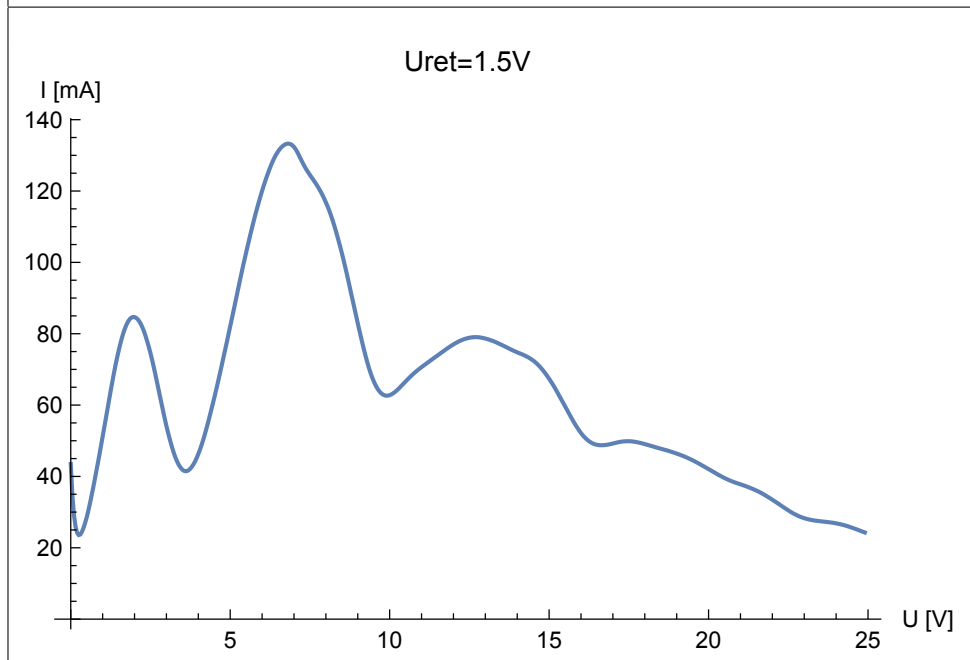
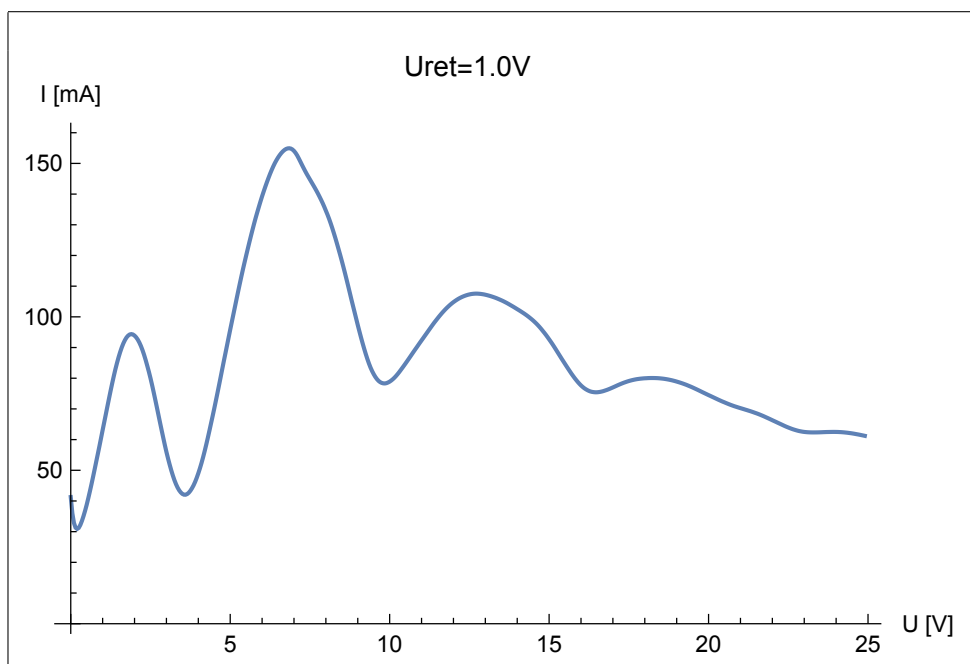
### 8.1 $T = 67^{\circ}\text{C}$

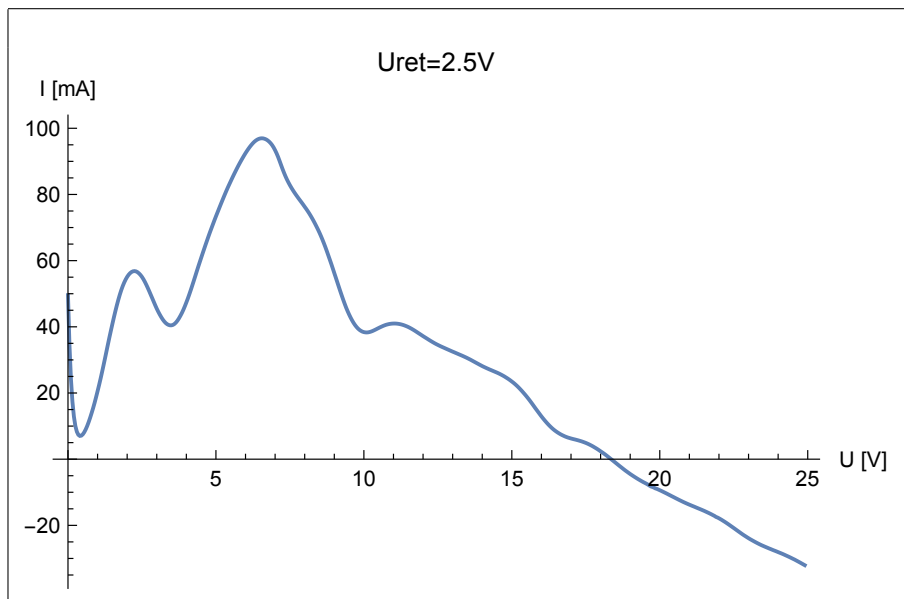




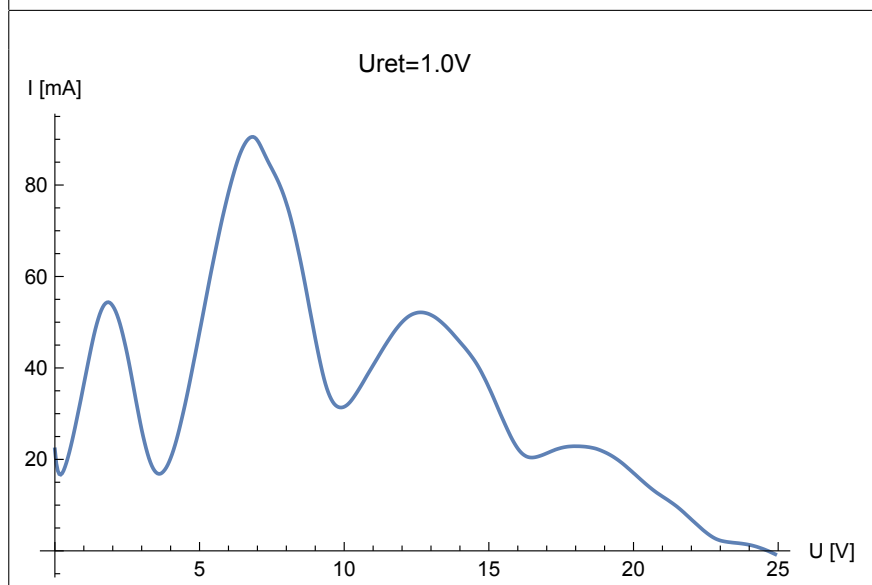
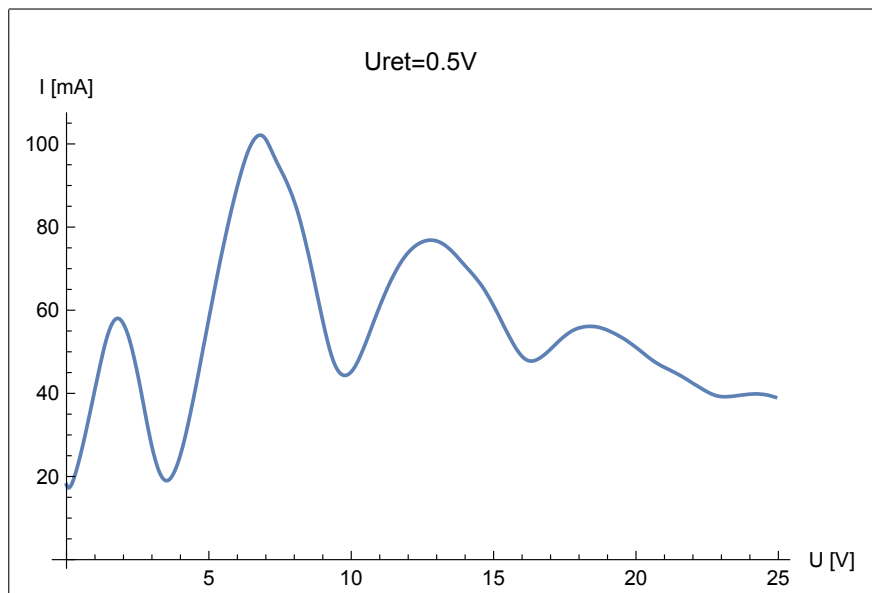
## 8.2 $T = 72^{\circ}C$

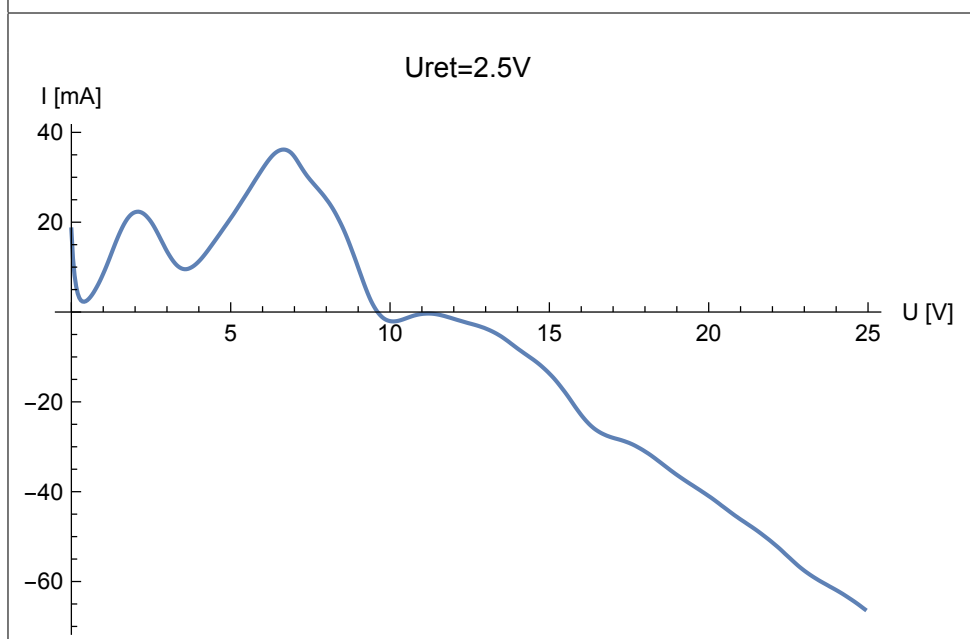
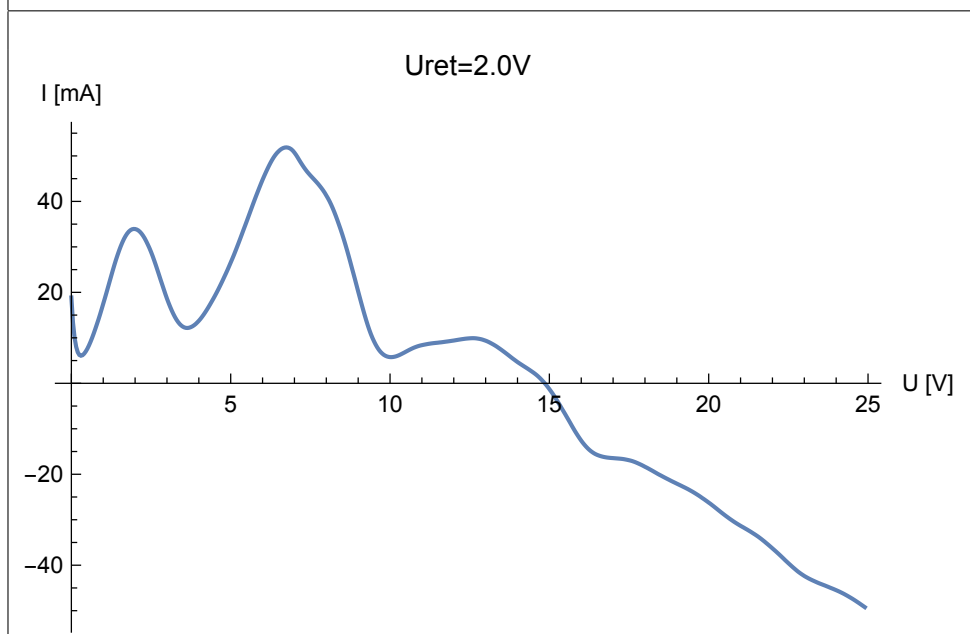
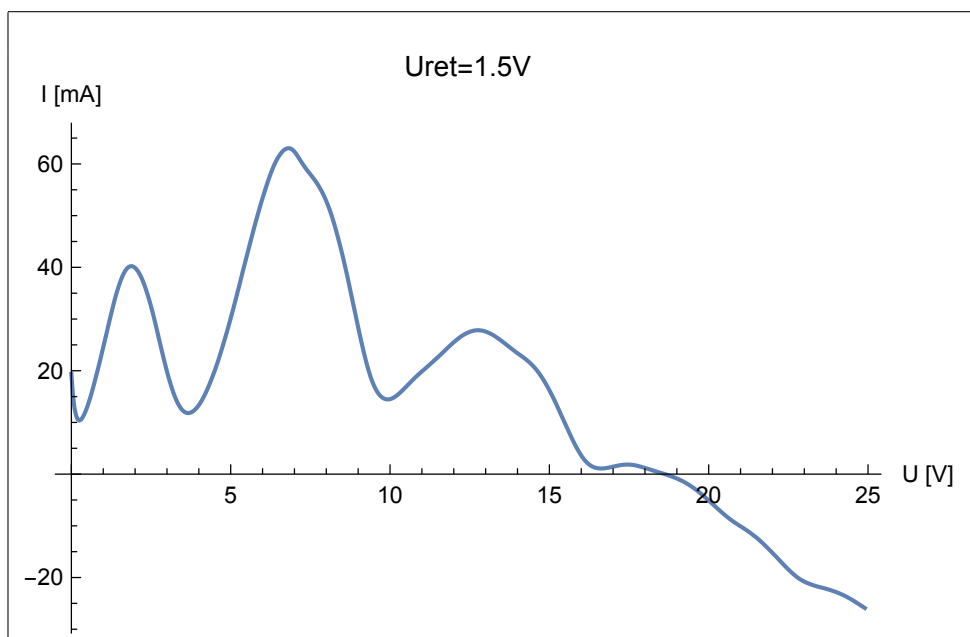






### 8.3 $T = 78^{\circ}C$





8.4  $T = 83^{\circ}\text{C}$

