

**ZADANIE WS3**  
**BADANIE EFEKTU FOTOELEKTRYCZNEGO ZEWNĘTRZNEGO**

**I. Cel ćwiczenia**

W ćwiczeniu bada się charakterystyczne zależności parametrów efektu fotoelektrycznego zewnętrznego i dzięki temu można wyznaczyć stałą Plancka.

**II. Podstawy teoretyczne**

Jeśli na powierzchnię metalu pada wiązka światła o odpowiedniej częstotliwości to możliwe jest „wybicie” elektronów poza materiał. Zjawisko to znane jest jako efekt fotoelektryczny zewnętrzny. Po raz pierwszy zaobserwował go H.R. Hertz w 1887 roku badając generację i odbiór fal radiowych. Systematyczne badania tego efektu przeprowadził A.G. Stoletow (1889r.) formułując tak zwane pierwsze prawo fotoefektu mówiące, że natężenie fotoprądu jest wprost proporcjonalne do intensywności padającego światła (publikacja w języku rosyjskim). Wyniki bardziej wszechstronnych badań opublikował w 1902 roku P.E.A. von Lenard<sup>1</sup>. Zinterpretował je natomiast A. Einstein w 1905 roku<sup>2</sup> zakładając, że światło przenosi porcje energii proporcjonalne do częstotliwości promieniowania. Idea fotonu została szeroko uznana dopiero po pracach A. Comptona 1923<sup>3</sup> nad rozpraszaniem promieniowania X na elektronach. Efekt fotoelektryczny polega na przekazaniu elektronowi przez foton energii  $h\nu$  ( $\nu$  to częstotliwość promieniowania, a  $h$  jest stałą Plancka). Jeśli dzięki temu elektron opuści materiał to pokonuje barierę potencjału  $\Phi$  (tak zwana praca wyjścia), a więc traci część swojej energii. Ostatecznie w próżni poza metalem może mieć najwyżej energię kinetyczną  $E$  równą:

$$E = h\nu - \Phi. \quad (1)$$

Najwyżej, bo oczywiście na skutek różnych oddziaływań wewnątrz materiału może jeszcze dodatkowo stracić energię. Jak widać z przedstawionego wzoru szansa na „wybicie” elektronu istnieje tylko dla promieniowania o odpowiednio dużej energii kwantu. Ta graniczna energia jest równa pracy wyjścia:

$$h\nu_{gr} = \Phi. \quad (2)$$

Jak z tego widać natężenie promieniowania nie ma wpływu zarówno na energię kinetyczną elektronów jak i częstotliwość graniczną. Wpływa jedynie na liczbę wybitych elektronów czyli na natężenie fotoprądu. Natężenie promieniowania jest proporcjonalne do liczby fotonów padających w jednostce czasu na jednostkę powierzchni.

Badanie fotoefektu, a właściwie właściwości wybitych elektronów będzie polegało na określeniu zależności liczby „produkowanych” elektronów od natężenia promieniowania  $P$  i od częstotliwości (energii kwantu). Takie bardzo szczegółowe pomiary wykonał R.A. Millikan<sup>4</sup> usiłując podważyć interpretację Einsteina efektu fotoelektrycznego. Jego wyniki w pełni potwierdziły jednak przewidywania teoretyczne. Jednocześnie badania te<sup>5</sup> pozwoliły na bardzo dokładne, jak no owe czasy, wyznaczenie stałej Plancka  $h$  i to jest ostatecznym rezultatem przeprowadzanego w tym ćwiczeniu doświadczenia.

---

<sup>1</sup> P. Lenard, Über die lichtelektrische Wirkung, Ann. Phys. **8**, 149–198 (1902).

<sup>2</sup> A. Einstein, Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Ann. Phys. **17**, 132–148 (1905).

<sup>3</sup> A. Compton, A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements, Phys. Rev. **21**, 483 (1923).

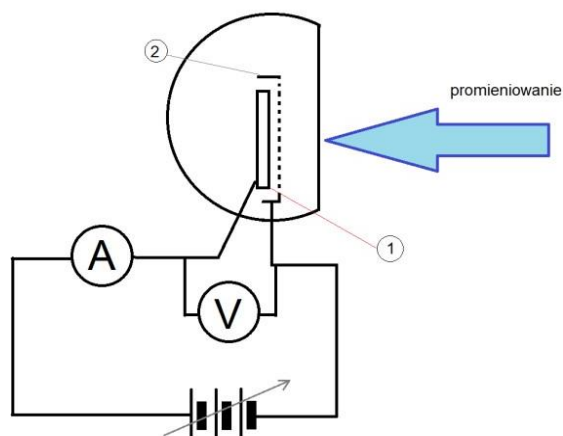
<sup>4</sup> R. A. Millikan, Einstein’s photoelectric equation and contact electromotive force, Phys. Rev. **7**, 18–32 (1916).

<sup>5</sup> R. A. Millikan, A direct photoelectric determination of Planck’s ‘h’, Phys. Rev. **7**, 355–388 (1916)

### III. Wykonanie pomiarów

W doświadczeniu posługujemy się zestawem przyrządów *Planck's „quantum of action” and external photoelectric effect* (Item No.: P2510502) firmy PHYWE<sup>6</sup>.

Aby zaprojektować doświadczenie musimy zauważyć, że liczba elektronów opuszczająca materiał (emiter) na jednostkę czasu jest proporcjonalna do natężenia prądu płynącego przez emiter. Zastanówmy się nad obwodem elektrycznym, który pozwoliłby zmierzyć właściwości tych elektronów. Oczywiście po opuszczeniu metalu powinny się one poruszać w próżni. Tylko w ten

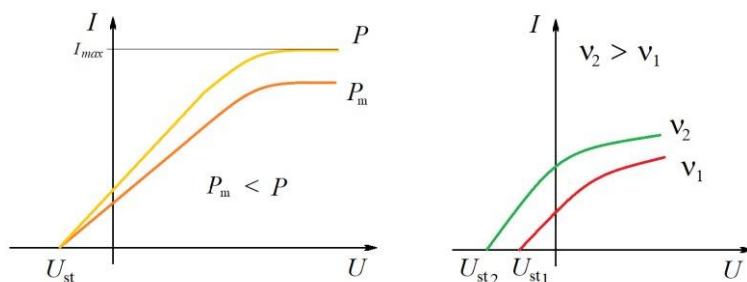


Rysunek 1. Obwód elektryczny do badania fotoprądu. *A* i *V* oznaczają odpowiednio amperomierz i woltomierz. Polaryzację zapewnia regulowany zasilacz (bateria). Cyframi oznaczono: 1 – emiter (badany metal), 2 – kolektor (siatka).

sposób unikniemy strat i zakłócających efektów (np. jonizacja cząsteczek gazów dostarczająca dodatkowych ładunków). Tak więc całość umieszczamy w próżniowej, przezroczystej bańce. Aby zebrać wszystkie, nawet te najwolniejsze elektrony, musimy umieścić nasz materiał w odpowiednio silnym polu elektrycznym, pozwalającym do elektrody zbierającej (kolektora) skierować także elektrony opuszczające metal w kierunku ścianek bańki. Jeśli dla mniejszych pól chcielibyśmy zminimalizować ucieczkę ładunków to kolektor powinien otaczać oświetlany element. Aby światło mogło swobodnie do tego elementu dotrzeć powinniśmy np. wykonać elektrodę z siatki. Tak doszliśmy do układu bardzo schematycznie przedstawionego na rysunku 1.

Jak powinny wyglądać charakterystyki prądowo-napięciowe zmierzone w takim układzie przy założeniu, że mamy idealne przyrządy pomiarowe?

Jeśli promieniowanie padające na płytkę ma częstotliwość powyżej częstotliwości granicznej  $\nu_{gr}$  to mimo przyłożonego zerowego napięcia wybijane elektrony powinny docierać do siatki elektrody i w układzie popłynie jakiś prąd. Jeśli będziemy zwiększać napięcie (biegun ujemny podłączony dopłytki) to coraz więcej elektronów będzie docierać do elektrody dodatniej (anody), a więc prąd będzie wzrastał. Jednak przy stałym natężeniu oświetlenia (promieniowania) liczba elektronów wybijanych w jednostce czasu jest stała. Przy odpowiednio dużym napięciu wszystkie te elektrony będą docierać do anody i zwiększenie napięcia tego nie zmieni. Osiągnęliśmy prąd



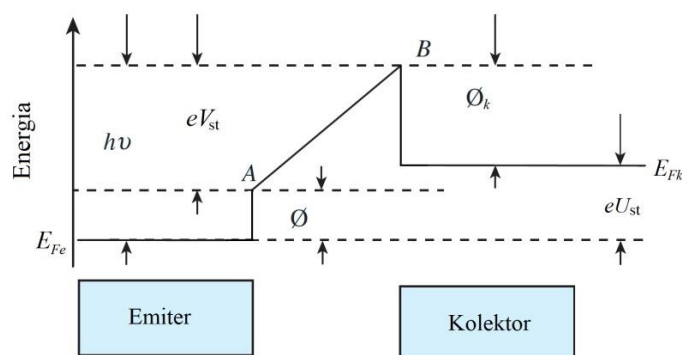
Rysunek 2. Charakterystyki prądowo napięciowe dla różnych natężeń oświetlenia *P* i dla różnych częstotliwości  $\nu$ .  $U_{st}$  oznacza napięcia zatrzymujące przepływ fotoprądu,  $I_{max}$  to prąd nasycenia.

nasycenia  $I_{max}$  niezależny od napięcia. Jeśli zwiększymy natężenie promieniowania, czyli liczbę wybijanych elektronów to prąd wzrośnie mimo utrzymania stałego napięcia. Takie zachowanie pokazują bardzo schematyczne charakterystyki prądowo-napięciowe przedstawione na rysunku 2. Oczywiście jeśli promieniowanie będzie miało

<sup>6</sup> <https://www.phywe.com/en/planck-s-quantum-of-action-and-extern-photoelectric-effec-effect-line-separationby-a-diffraction-grating.html>

częstotliwość mniejszą od częstotliwości granicznej to niezależnie od przyłożonego do komórki napięcia prąd nie będzie płynął. Oznacza to, że fotokomórka będzie miała praktycznie „nieskończony” opór – znacznie większy od oporu wewnętrznego woltomierza.

Następnie do komórki przyłożymy napięcie odwrotnie spolaryzowane – biegun ujemny do siatki i biegun dodatni do badanego metalu. Oczywiście metal nadal oświetlamy promieniowaniem o częstotliwości większej od częstotliwości granicznej. Wtedy przy zwiększonym napięciu coraz mniej elektronów będzie docierało do siatki (prąd będzie malał), aż przy pewnym napięciu  $U_{st}$  przestanie płynąć. To napięcie związane jest z maksymalną energią kinetyczną wybijanych z metalu elektronów. Dla takiego napięcia różnica potencjałów między elektrodami jest za duża aby elektron mógł ją pokonać. Niestety nie można jej interpretować jako miary pracy wyjścia  $\Phi$  ze wzoru (1). Problem ten ilustruje rysunek 3. Idea pochodzi z pracy Yuvala Ben-Abu<sup>7</sup> (bardzo polecamy przeczytanie).



Rysunek 3. Schemat poziomów energii w komórce fotoelektrycznej spolaryzowanej napięciem zatrzymującym przepływ prądu  $U_{st}$ .  $E_{Fe}$  i  $E_{Fk}$  oznaczają energie Fermiego w emitersze i kolektorze,  $V_{st}$  to potencjał odpowiadający zatrzymaniu ruchu elektronów w fotokomórce.  $\Phi_k$  to praca wyjścia dla kolektora zaś  $\Phi$  oznacza pracę wyjścia dla emitera.  $h\nu$  to energia graniczna kwantu promieniowania.

Jak widać z rysunku 3 mamy równość energii:

$$\Phi + eV_{st} = \Phi_k + eU_{st} . \quad (3)$$

Maksymalną energię kinetyczną opisuje wzór (1) i jest ona równa tej granicznej energii potrzebnej na pokonanie w polu elektrycznym drogi z A (powierzchnia emitera) do B (powierzchnia kolektora). Zatem równanie (3) po skorzystaniu z równania (1) ma postać:

$$\Phi + h\nu - \Phi = \Phi_k + eU_{st} .$$

Co prowadzi do równania opisującego zależność napięcia stopującego prąd fotoelektryczny  $U_{st}$  od częstotliwości promieniowania postaci:

$$eU_{st} = h\nu - \Phi_k . \quad (4)$$

Jeśli wykreślimy zależność energii  $eU_{st}$  w funkcji częstotliwości to powinniśmy otrzymać zależność liniową, a współczynnik nachylenia będzie równy stałej Plancka. Właśnie takie doświadczenie wykonał R.A. Millikan w pracy<sup>5</sup> wyznaczając  $h$  z dokładnością do 1% w porównaniu z obecnie przyjmowaną wartością. Sprawdźmy jaką wartość  $h$  otrzymamy w omawianym doświadczeniu. Należy zwrócić uwagę, że aby wyznaczyć stałą  $h$  trzeba znać wartość ładunku elementarnego  $e$ . Ale to właśnie Millikan ją wyznaczył po raz pierwszy. Jeśli dla danych Millikana wstawić obecnie przyjętą wartość ładunku elektronu to stałą Plancka otrzymamy z dokładnością do 0,5%.

<sup>7</sup> Yuval Ben-Abu, Misleading points in the teaching of Millikan's experiment on the photoelectric effect, Phys. Educ. 52 043006 (2017).

### III.1. Wyposażenie

Jak podano w instrukcji do zestawu PHYWE<sup>8</sup> mamy do dyspozycji następujące elementy:

- Zasilacz DC: 0-12 V, 2 A; AC: 6 V, 12 V, 5 A (podwójny do oświetlacza i fotokomórki) (2);

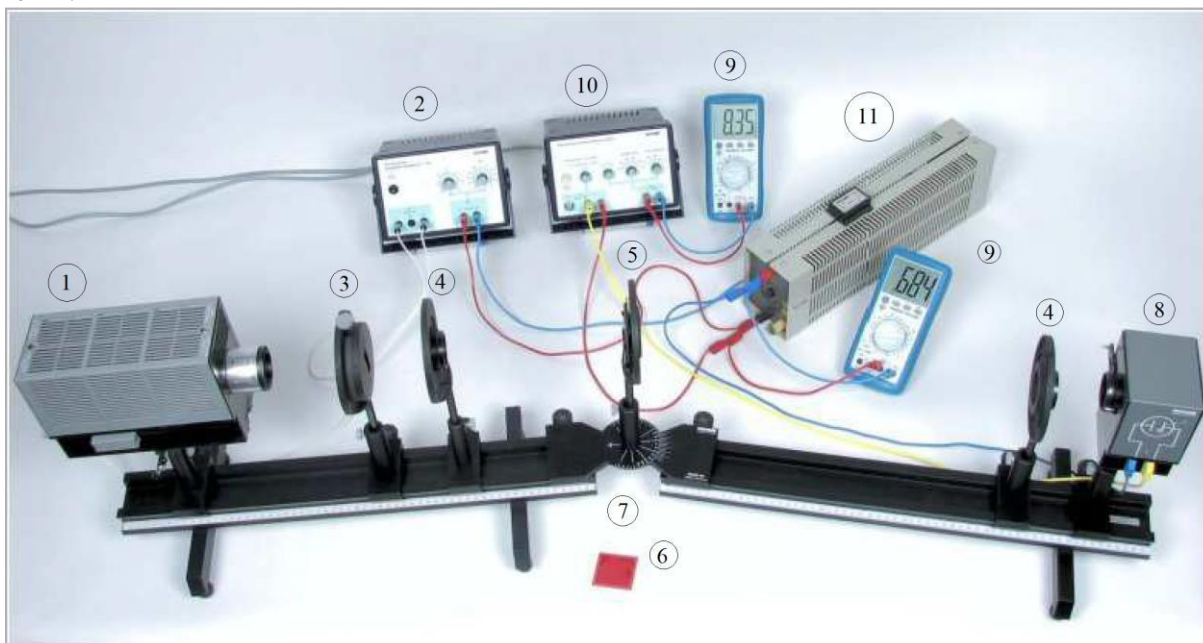
#### Elementy układu optycznego:

- Oświetlacz (obudowa, żarówka, kondensor  $f = 60$  mm) (1);
- Szczelina regulowana w uchwycie (3);
- Dwie soczewki  $f = 100$  mm w uchwytach (4);
- Siatka dyfrakcyjna 600 linii/mm w uchwycie (5);
- Filtr kolorowy transmisyjny dla fali o długości  $\lambda = 595$  nm (6);
- Dwie ławy optyczne 600 mm połączone 100 mm przegubem obrotowym z odczytem kąta (7).

#### Elementy układu elektrycznego fotokomórki:

- Fotokomórka w obudowie z przesłoną (z pionową szczeliną i dużym otworem) (8);
- Dwa mierniki uniwersalne 3 1/2 cyfry do pomiaru napięcia na fotokomórce oraz odczytu prądu z układu wzmacniającego (9);
- Uniwersalny wzmacniacz pomiarowy PHYWE (10);
- Opornica suwakowa 100 Ohm, 1,8A (11);
- Przewody zakończone wtykami bananowymi.

Zdjęcie układu pomiarowego wraz z oznaczonymi kolejnymi numerami jego elementami przedstawia rysunek 4.



Rysunek 4. Zdjęcie ustawionego układu pomiarowego (z instrukcji PHYWE<sup>8</sup>). Liczby opisują elementy przedstawione w spisie przyrządów

### III.2. Planowanie pomiarów

Przed przystąpieniem do ustawiania układu pomiarowego musimy pamiętać, że płynące w układzie prądy są bardzo małe, a więc pomiar będzie wymagał używać wzmacniacza oraz, jak wspominaliśmy

<sup>8</sup> <https://repository.curriculab.net/files/versuchsanleitungen/p2510502/p2510502e.pdf>

wcześniej, oporność fotokomórki jest dużo większa od oporności wewnętrznej woltomierzy. Ustawiony układ przedstawiony jest na rysunku 4. Jednak przed przestąpieniem do jego ustawienia musimy odpowiedzieć sobie na następujące pytania:

### I. Część optyczna:

Jak działa siatka dyfrakcyjna?

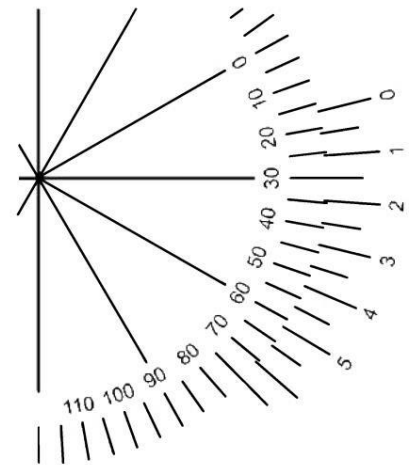
Jaka jest zależność długości fali promieniowania ugiętego w pierwszym rzędzie od kąta obserwacji? Jakiej częstotliwości odpowiada ta długość? Jaka jest energia kwantu?

Jaka fala powinna padać na siatkę aby móc zastosować wspomniany wzór? Jak to można zrealizować? Jak odczytać kąt z kątomierza z noniusem przedstawionego na rysunku 5?

Na szczeliny powinniśmy otrzymać obraz żarówki. Jak to uzyskać?

Na przesłonie wejściowej fotokomórki powinniśmy mieć obraz szczeliny. Jak to zrobić?

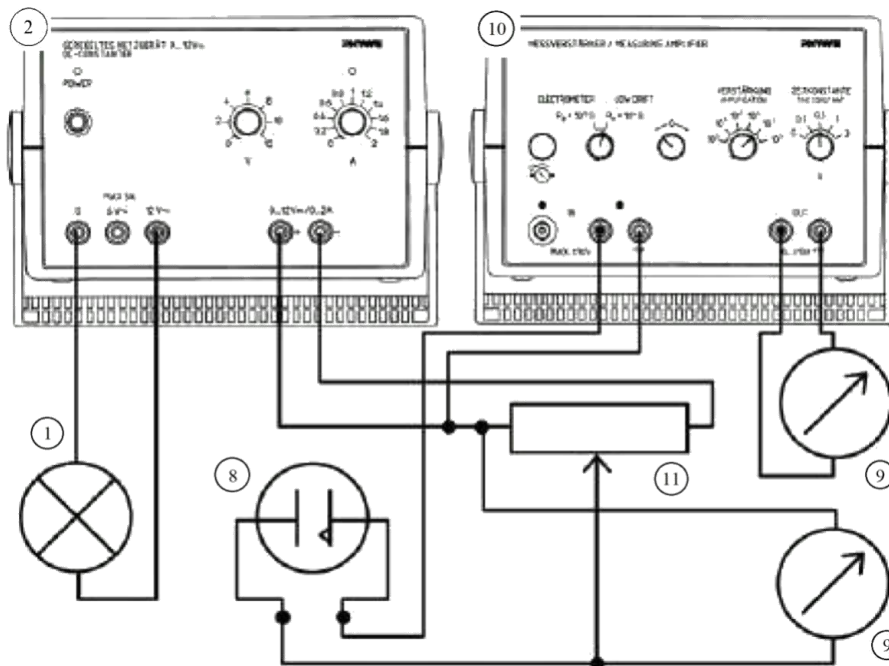
Należy pamiętać, że ławy optyczne mają po 60 cm. Oświetlacz ustawiony w uchwycie znajdującym się na początku ławy sięga do 16 cm. W oświetlaczu można przesuwając żarówkę. Siatkę dyfrakcyjną można obracać w uchwycie – dlaczego?



Rysunek 5. Kątomierz z noniusem (7) do określenia kąta ugiętego promienia wskazujący  $16,5^\circ$ .

### II. Część elektryczna:

Napięcie będziemy regulować stosując połączenie potencjometryczne wykorzystując zasilacz DC ustawiony na odpowiednie napięcie oraz opornik suwakowy. Naszkicuj schemat takiego układu. Następnie wstaw w odpowiednie miejsce w tym schemacie fotokomórkę. Dorysuj amperomierz pamiętając, że w prawdziwym układzie będzie to wzmacniacz z odczytem za pomocą woltomierza. Teraz możesz już rysować woltomierz pamiętając, że jego opór wewnętrzny jest mniejszy od oporu fotokomórki i jeśli zrealizujesz podłączenie w sposób pokazany na rysunku 1 to woltomierz będzie zwierał fotokomórkę i praktycznie cały prąd będzie płynął przez niego.



Rysunek 6. Schemat połączeń elektrycznych do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych fotokomórki.



Porównaj wykonany schemat z zaproponowanym przez PHYWE<sup>8</sup> i przedstawionym na rysunku 6. Symbol żarówki oznacza oświetlacz. Kółka ze strzałką oznaczają woltomierze. Liczby w kółkach oznaczają przyrządy wymienione w spisie. Po ustawieniu układu możemy przystąpić do pomiarów.

**Pamiętaj – przed włączeniem zasilania układ musi być sprawdzony przez asystenta.**

### III.3 Wykonanie pomiarów

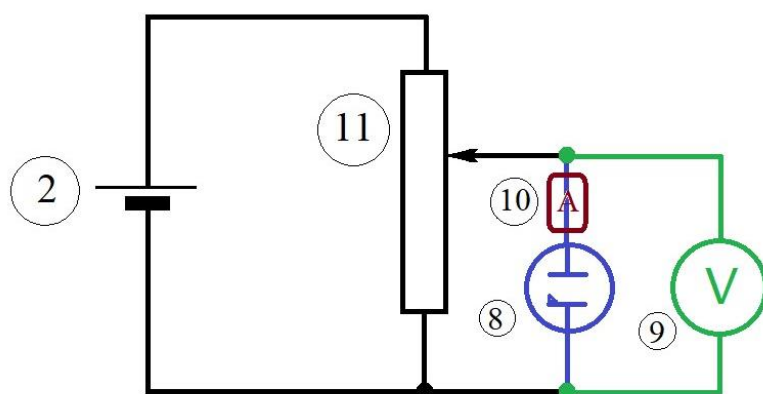
1. Ustaw odpowiednio układ optyczny (połączenia elektryczne są już w znacznej części wykonane ale należy je sprawdzić).
2. Wyznacz częstotliwość światła  $\nu$  w zależności od kąta pomiędzy osiami połączonych ław optycznych. Sprawdź ustawienie na kolorowym filtrze.
3. Wyznacz częstotliwość graniczną (pomiar kąta granicznego).
4. Wykonaj co najmniej trzy charakterystyki prądowo-napięciowe w tym dwie dla różnych częstotliwości światła. W obszarze światła czerwonego wykonaj charakterystykę z filtrem pomarańczowym i bez filtru. Czy natężenie prądu nasycenia zależy od szerokości szczeliny?
5. Posługując się informacjami z wykonanych charakterystyk wyznacz napięcie hamowania  $U_{st}$  dla różnych częstotliwości światła  $\nu$  (łącznie co najmniej siedmiu). Pamiętaj o zastosowaniu filtru dla kątów większych od  $20^\circ$ . Wykonaj wykres zależności  $U_{st}$  od  $\nu$ .
6. Z otrzymanej zależności  $U_{st}(\nu)$  wyznacz stałą Plancka (wraz z niepewnością). Porównaj z tą obecnie uznaną za podstawową stałą układu SI.

#### Informacje uzupełniające (koniecznie przeczytaj):

Szczegóły dotyczące postępowania przy pomiarach – ustawienie układu, nastawienie przyrządów itp. można znaleźć w instrukcji PHYWE8 na stronie: <https://repository.curriculab.net/files/versuchsanleitungen/p2510502/p2510502e.pdf> lub w wersji spolszczonej:

[https://physics.uwb.edu.pl/wf/wp-content/uploads/2018/12/IPF\\_39.pdf](https://physics.uwb.edu.pl/wf/wp-content/uploads/2018/12/IPF_39.pdf).

Schemat potencjometrycznego układu z kolejnymi dostawianymi fragmentami wg. zaleceń z głównej części instrukcji został ukazany na Rys. 7.



Rysunek 7. Uproszczony schemat połączenia potencjometrycznego. Kolorami zaznaczono kolejne kroki zgodnie z poleceniami instrukcji głównej. Liczby w kółkach oznaczają przyrządy wymienione w spisie.

**Ustawienia elektryczne:**

- Wzmacniacz pomiarowy należy ustawić w trybie „low drift” ze wzmacnieniem  $10^4$  i stałą czasową 0,3 s.
- Zerowanie uniwersalnego wzmacniacza – bez podłączenia sygnału na wejściu, ustaw, za pomocą przycisku zerowania, napięcie wyjściowe wzmacniacza na zero.
- Wejście wzmacniacza ma odporność  $10.000 \Omega$ . Jeśli wzmacniacz jest ustawiony na wzmacnienie  $10^4$ , 1 V na wyjściu wzmacniacza odpowiada 0,0001 V na wejściu, a tym samym odpowiada natężeniu prądu 10 nA.
- Stała czasowa jest ustawiona tak, aby uniknąć błędów spowodowanych wpływem szumów pochodzących z sieci.
- Sugerowane ustawienia zasilacza: napięcie 3 V, natężenie prądu 1 A. Potem można dostosować je do potrzeb pomiarowych.
- Napięcie na wyjściu ze wzmacniacza jest proporcjonalne do natężenia „fotoprądu”.
- Należy zmierzyć graniczne kąty dla pierwszego rzędu widma dyfrakcyjnego światła (dla siatki 600 linii/mm to około  $13^\circ$  i  $25^\circ$ ).
- Aby zapobiec zakłóceniom UV, światło może przechodzić przez czerwony filtr (dla kąta dyfrakcji od  $21^\circ$ ). Należy przetestować konieczność użycia filtru (patrz punkt 4 w III.3). Dlaczego w tym obszarze może pojawić się nadfiolet? (patrz dodatek o elementach optycznych)

**IV. Analiza wyników pomiarów**

Analiza danych powinna zawierać następujące elementy:

- Oszacowanie niepewności mierzonych wielkości (napięcia, natężenia, kątów itd.).
- Oszacowanie niepewności wyznaczonych napięć hamowania.
- Wyznaczenie niepewności stałej Plancka.
- Przedyskutowanie wpływu warunków doświadczalnych na wyznaczone wielkości – powtarzalność wyników, szумы itp.

Jeśli na którymś z etapów analizy danych prowadzisz dopasowanie zależności modelowej metodą najmniejszych kwadratów, **obowiązkowo** podaj postać dopasowywanej funkcji oraz określ przyjęte niepewności. Podaj uzasadnienie wyboru zmiennej niezależnej, za wyjątkiem sytuacji, w których ona jest z góry narzucona. Przeprowadź walidację modelu uwzględniającą zasadność przyjętych niepewności pomiarowych. Jako wynik dopasowania podaj estymaty dopasowywanych parametrów wraz z ich niepewnościami. W uzasadnionych przypadkach przedyskutuj istotność dopasowywanych parametrów. Do dobrej praktyki należy również w przypadku dopasowania funkcji opisaną więcej niż jednym parametrem podanie kowariancji i współczynników korelacji parametrów a także wykresu reszt z tego dopasowania oraz jego dyskusja.

Pamiętaj też, że najczęściej używana metoda najmniejszych kwadratów wymaga wyników pomiarowych, z których każdy uzyskany jest w niezależnym akcie pomiarowym. **Nie mają takiego charakteru wielkości uzyskane np. w wyniku odejmowania jednej ustalonej wartości od wszystkich wyników pomiarów, jeśli wartość odejmowana pochodzi z pomiaru.**

**V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu**

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w [wymaganiach dotyczących raportu](#) zamieszczonymi na stronie pracowni. Absolutnie zalecane jest także świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, a także tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku

do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

W raporcie **obowiązkowo** zamieść wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Pamiętaj, że w niektórych przypadkach uzasadnione jest przeniesienie tych danych do Suplementu. W przypadku bardzo dużej liczby danych pomiarowych (np. zebranych komputerowo) dopuszczalne jest umieszczenie danych nie w formie tabel, ale w formie wykresów. Wówczas oryginalne dane należy dołączyć do raportu w formie cyfrowej (np. w wiadomości email do prowadzącego).

## VI. Literatura uzupełniająca

- Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna cz. V, Wyd. V, PWN, Warszawa 1976.
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki cz. V, PWN, Warszawa 2007.
- A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski Wstęp do fizyki, cz. 2 PWN, Warszawa 1976.
- <https://www.bipm.org/en/measurement-units> lub <https://www.nist.gov/si-redefinition> lub <https://gum.gov.pl/pl/redefinicja-si/redefinicja-si/2334,Redefinicja-SI.html>

## VII. Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

Podstawowy zestaw problemów został przedstawiony w części III.2 „Planowanie pomiarów”.

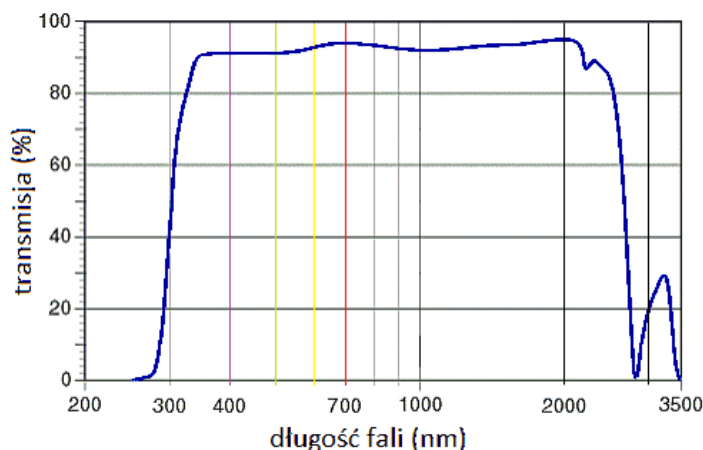
**Problemy dodatkowe:** W jakim obszarze kątów dyfrakcji spodziewamy się wystąpienia jednocześnie promieniowania ugiętego na siatce 600 l/mm w pierwszym i drugim rzędzie ugięcia. Jak na to wpływają elementy optyczne układu takie jak soczewki oraz jak wpływa charakterystyka źródła światła. Informacje przydatne do odpowiedzi na te pytania znajdują się w dodatku o elementach optycznych.

*Opracował: Andrzej Witowski, 2020 r.*



## Elementy optyczne – dodatek

W każdym układzie badającym właściwości optyczne znajdziemy takie elementy jak soczewki, źródła światła, czy też elementy dyspersyjne (siatki, pryzmaty). Właśnie one często wyznaczają granice badań spektralnych układu. Promieniowanie elektromagnetyczne (EM) z zakresu widzialnego ma długości fal od około 400 nm (fiolet) do około 700 nm (czerwony). Nie znaczy to, że jeśli światła nie widzimy to w układzie nie propaguje się fal EM. Być może występuje promieniowanie z zakresu nadfioletu (UV) lub podczerwieni (IR).



Rysunek 1D. Transmisja szkła pyrex na podstawie danych z <https://asgs-glass.org/optical-transmission/>

Zastanówmy się jakie ograniczenia wprowadzają elementy szklane. Zasadniczo większość szkieł ma zbliżone charakterystyki widmowe. Typowe widmo transmisji szkła (pyrex) przedstawione jest na Rysunku 1D. Jak widać szkło przepuszcza promieniowanie nadfioletowe od co najmniej 300 nm oraz podczerwone do ok. 2,5  $\mu\text{m}$ .

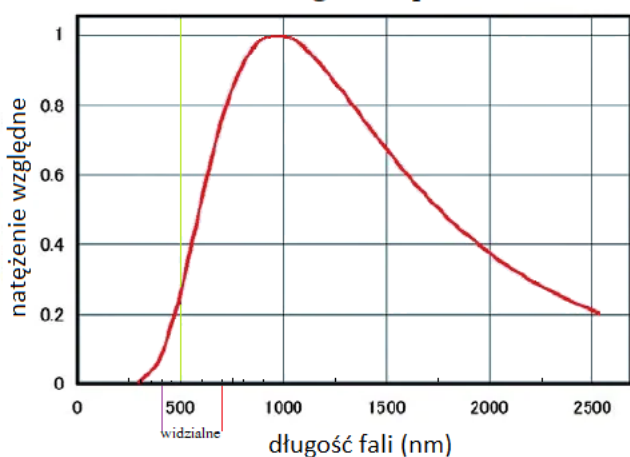
Kolejnym elementem, który ogranicza nasze możliwości pomiarowe jest źródło światła. Zazwyczaj w obszarze spektralnym zbliżonym do światła widzialnego stosujemy lampy halogenowe. Bardzo dobry opis działania żarówki halogenowej można znaleźć na stronie:

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>.

Aby móc porównać zakres spektralny lampy halogenowej z zakresem transmisji szkła na Rysunku 2D przedstawiamy widmo takiej żarówki. Należy pamiętać, że ze względu na wysoką temperaturę panującą we wnętrzu żarówki jej bańka zrobiona jest ze szkła kwarcowego, które przepuszcza nadfiolet lepiej niż zwykłe szkło.

www.shimadzu.com

### Halogen lamp



Rysunek 2D. Widmo żarówki halogenowej w.g. danych ze strony <https://www.shimadzu.com>. Zaznaczony został obszar światła widzialnego.

Jak widać z rysunku początek świecenia przypada na około 300 nm, zaś maksimum osiągnięte jest dla około 1  $\mu\text{m}$  czyli w bliskiej podczerwieni.

Wydaje się, że pomiary będziemy mogli wykonywać dla długości fali od około 350 nm do kilku mikrometrów, choć częstość graniczna badanej fotokomórki wypada w bliskiej podczerwieni, a więc nie będzie potrzeby przekroczenia 1000 nm.

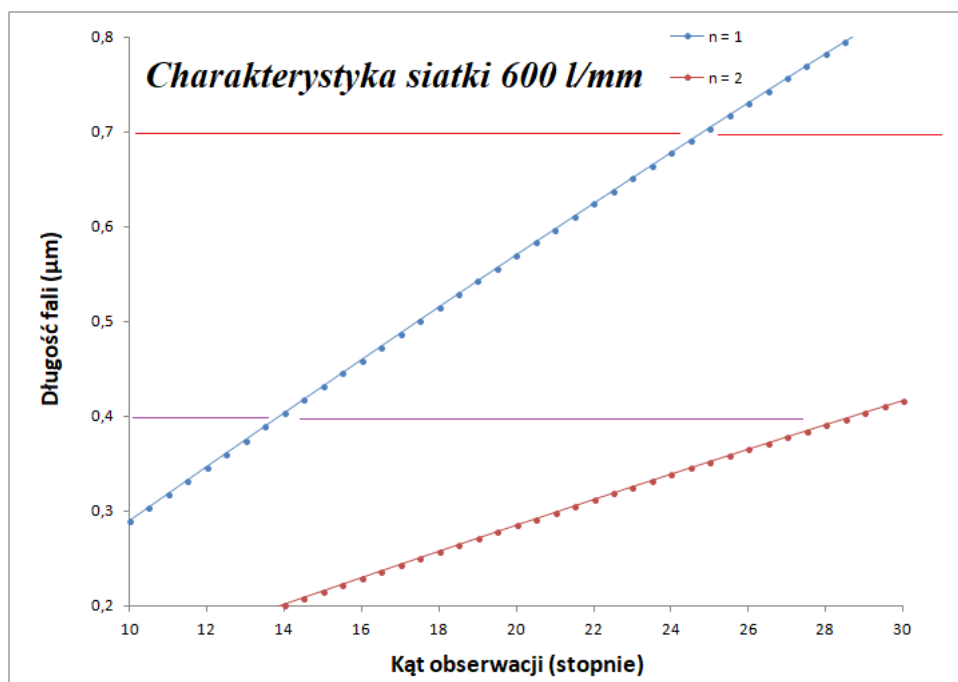
Do uzyskanie wybranej długości fali

zastosujemy siatkę dyfrakcyjną 600 linii na milimetr. Oznacza to, że tak zwana stała siatki  $d$  wynosi 1,667  $\mu\text{m}$ . Zależność pomiędzy kątem  $\alpha$  odchylenia promienia o długości fali  $\lambda$  oraz stałą siatki ma znaną postać:

$$d \sin \alpha = n \lambda ,$$

gdzie  $n$  jest rzędem ugięcia. Rząd zerowy odpowiada brakowi ugięcia i obserwujemy prążek biały. Podstawowe widmo obserwujemy w pierwszym rzędzie. Zwróćmy jednak uwagę, że dla danego kąta będziemy mieli, o ile to możliwe, promieniowanie pierwszego rzędu o długości dani  $\lambda$  oraz promieniowanie drugiego rzędu o długości fali  $\lambda/2$ . Stanowić to może pewien problem np. dla fali o długości 700 nm, z którą występuje fala 350 nm. Fotokomórka może nie być czuła na światło o długości podstawowej ale będzie reagować na światło 350 nm. Z tej przyczyny możemy obserwować fałszywy niezerowy sygnał. Dlatego w układu opartych na siatkach dyfrakcyjnych stosuje się filtry blokujące promieniowanie „wyższych rzędów”.

Zależność długości fali od kąta obserwacji przedstawiono na rysunku 3D dla pierwszego i drugiego rzędu widma. Dzięki niej można wyznaczyć obszar, w którym powinniśmy stosować filtr transmisyjny.

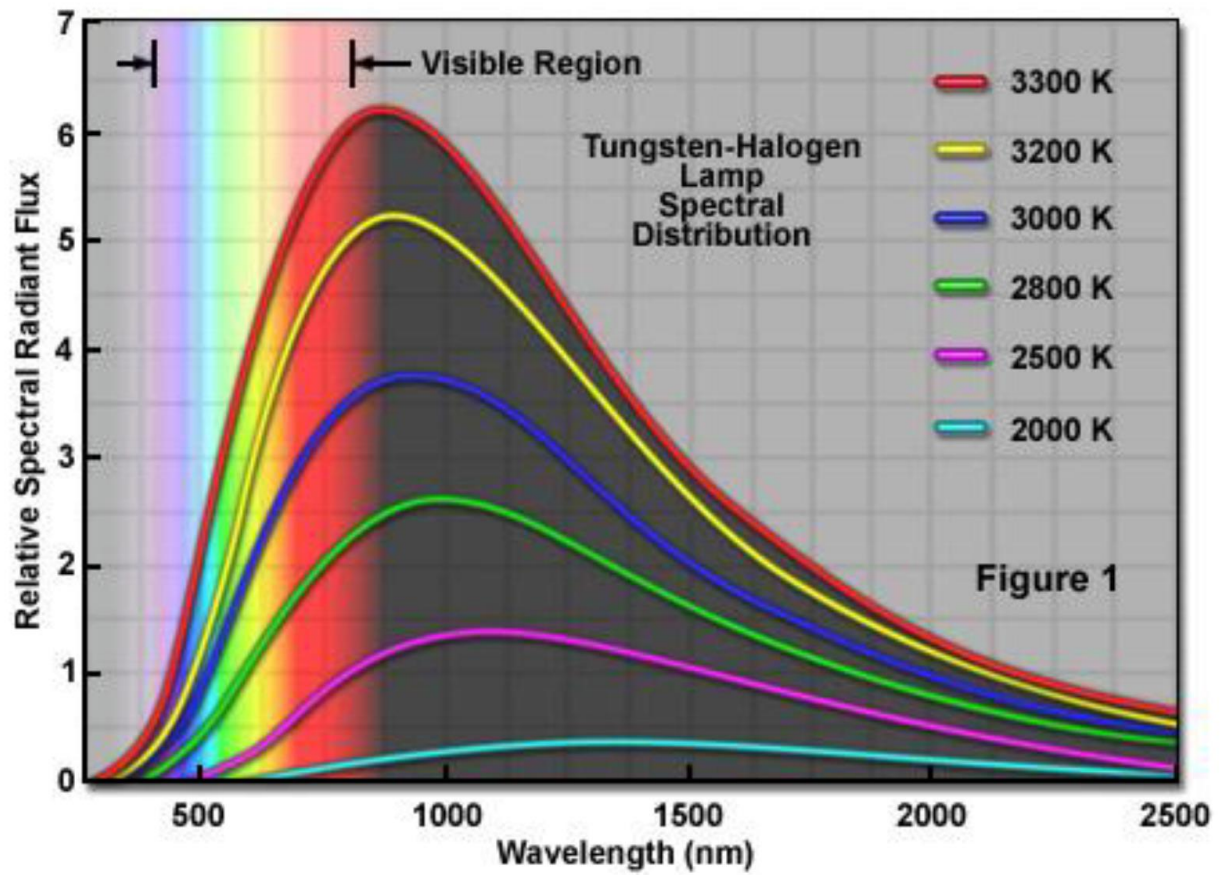


Rysunek 3D. Zależność długości fali od kąta obserwacji dla siatki 600 l/mm. Zaznaczono na niebiesko widmo pierwszego rzędu, a na czerwono drugiego rzędu. Linie poziome ograniczają obszar światła widzialnego.

Obok wymienionych powyżej stron internetowych bardzo interesujące informacje dotyczące omawianych problemów można znaleźć także pod adresami:

<http://www.if.pwr.edu.pl/~kurzynowski/Studenckie/Wybrane%20zagadnienia/zrodla.pdf>

[https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProp/Slides/GlassProp\\_Lecture18\\_Lucas3.pdf](https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProp/Slides/GlassProp_Lecture18_Lucas3.pdf)



Bardzo dobry tekst o żarówkach halogenowych:

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>