

OPTOELEKTRONIKA I FOTONIKA

Laboratorium dla studentów II roku EiT

3. Badanie charakterystyk czułości widmowej fotoelementów: fotodiody, fotorezystora i fototranzystora

Laboratorium – 523, C-2, V piętro

Mgr inż. Mateusz Kocoń

Dr hab. inż. Barbara Swatowska, prof. AGH

Dr hab. inż. Andrzej Brudnik, prof. AGH

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z metodyką pomiarów czułości widmowej najpopularniejszych fotoelementów, do których zaliczamy fotodiody, fotorezystory, fototranzystory oraz fotoogniwa. Układ pomiarowy, stworzony przez Pana mgr inż. Grzegorza Jaśko, obecnie zmodyfikowany przez Pana mgr inż. Mateusza Koconia, można także wykorzystywać do pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych detektorów półprzewodnikowych.

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia proszę zapoznać się z opisem stanowiska pomiarowego i programu FOCON.

Na zaliczenie wymagane będzie pisemne **sprawozdanie** z wykonanych pomiarów. Sprawozdanie należy dostarczyć **w terminie do 10 dni** po odbyciu ćwiczenia. Plik w formacie pdf należy wysłać na adres mailowy prowadzącego daną grupę laboratoryjną. Opóźnienie w dostarczeniu sprawozdania będzie miało odzwierciedlenie **w obniżeniu oceny**.

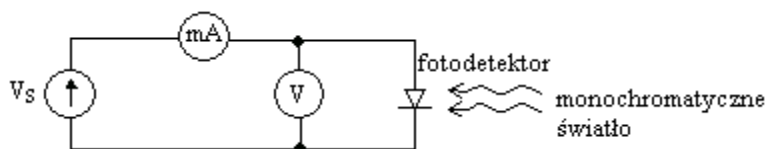
W ramach realizacji tego ćwiczenia obowiązuje znajomość następujących zagadnień:

- co to jest fotodetektor, przykłady i zasada działania,
- na czym polega pomiar czułości widmowej fotodetektora,
- jak wyglądają charakterystyki I-V popularnych fotoelementów: fotodiody, fotorezystora i fototranzystora (typ zależności, kształt),
- jakie materiały są stosowane do produkcji fotoelementów,
- jakie rozróżniamy zakresy pracy fotodiody,
- w odniesieniu do jakich elementów mówimy o latencji i co to jest,
- przykłady zastosowań fotodiody, fotorezystora i fototranzystora.

Stanowisko do pomiaru fotoprzewodnictwa

Układ pomiarowy

Pomiar czułości widmowej fotodetektorów polega na pomiarze fotoprądu w funkcji długości padającego na detektor promieniowania. Stanowisko składa się z komory pomiarowej, monochromatora, źródła napięcia stałego, źródła monochromatycznego oraz woltomierza i amperomierza. Badany fotodetektor znajduje się w komorze pomiarowej uniemożliwiającej oświetlanie go innym światłem, niż pochodzącym z monochromatora. Ogólny schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat aparatury do pomiaru fotoprzewodnictwa.

W zestawionym stanowisku laboratoryjnym badany detektor jest umieszczony w komorze pomiarowej i oświetlany światłem monochromatycznym pochodzącym z monochromatora SPM2.

Na Rys. 2 przedstawiono widok monochromatora wraz z zaznaczonymi poszczególnymi punktami regulacyjnymi. Wartość długości fali, ustawianej na monochromatorze, odczytuje się na skali projekcyjnej, umieszczonej w centralnej części czołówki aparatury. Ustawienie monochromatora może być dokonane ręcznie przy pomocy pokrętła lub przy użyciu silnika krokowego.



Rys. 2. Monochromator SPM2 wraz ze źródłem światła (oświetlaczem). W oświetlaczu zamontowana jest żarówka projekcyjna 6V/30W, zasilana przez stabilizator napięcia.

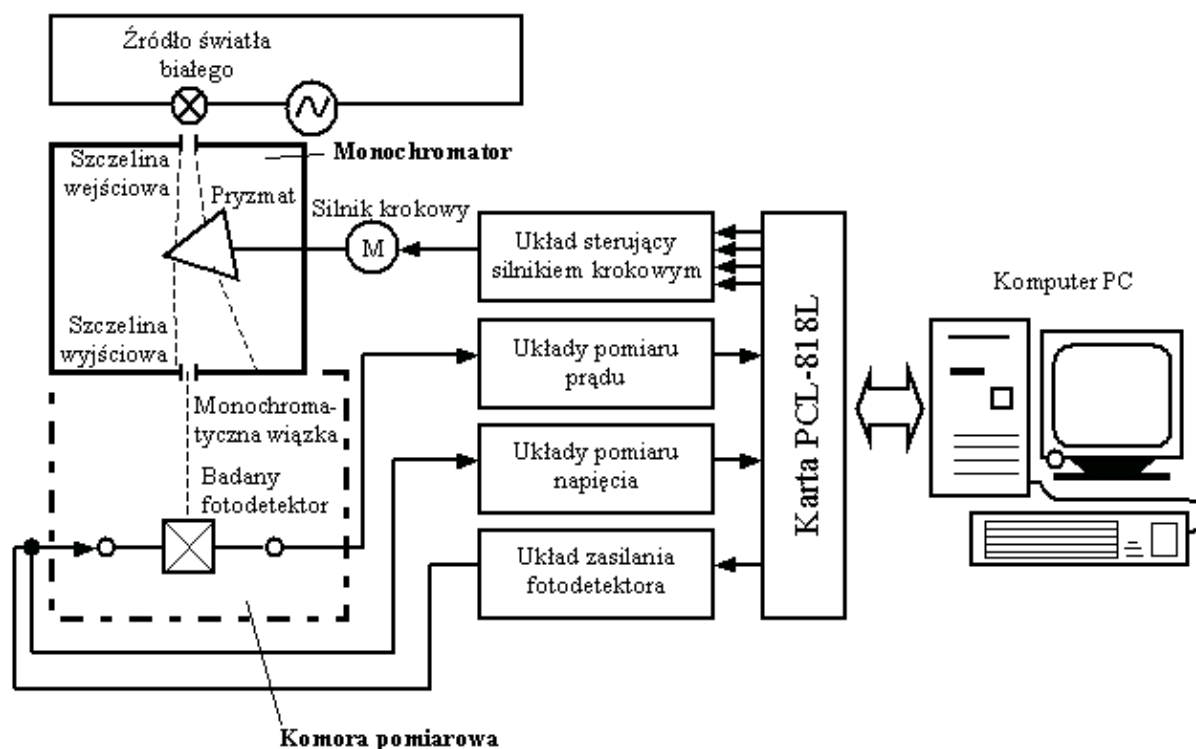


Rys. 3. Wnętrze komory pomiarowej z uchwytem badanych fotodetektorów.

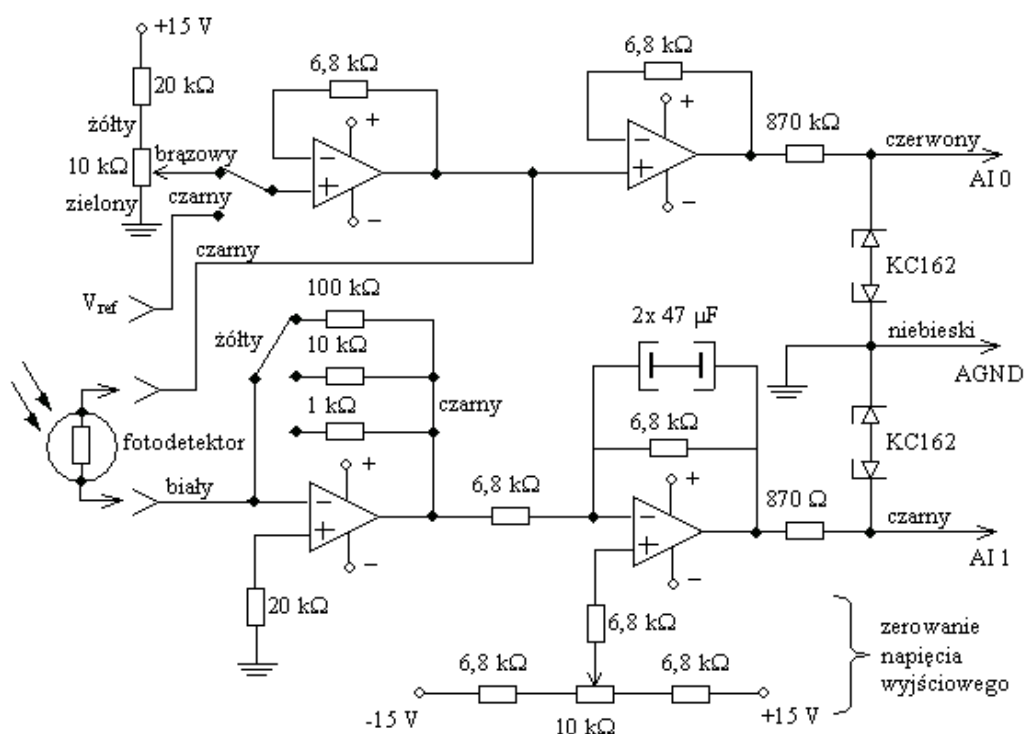
Badany detektor zamocowuje się w uchwycie pomiarowym, który jest umieszczony na ławie optycznej bezpośrednio przy szczelinie wyjściowej monochromatora. Wielkość otwarcia tej szczeliny, decydującej o ilości światła padającego na detektor, ustawiamy pokrętkiem regulacyjnym: położenie „0” – odpowiada całkowitemu zamknięciu szczeliny; położenie „1.5” – odpowiada maksymalnej wartości oświetlenia na wyjściu monochromatora. Oczywiście wraz ze zwiększeniem

szerokości szczeliny wyjściowej monochromatora, pogarsza się monochromatyczność wiązki światła, ale jest ona cały czas wystarczająca do wykonania ćwiczenia.

Wartości napięcia polaryzującego detektor i prądu detektora, są przekazywane na wejście 12 bitowych przetworników A/D karty kontrolno-pomiarowej PCL818 zainstalowanej w komputerze klasy PC. Cyfrowe wyjścia tej karty są użyte do sterowania kluczami załączającymi poszczególne fazy silnika krokowego (Rys. 2), sterującego ustawieniem pryzmatu w monochromatorze. Rysunek 4 przedstawia schemat blokowy całego stanowiska pomiarowego, natomiast Rys. 5 – schemat elektryczny układu polaryzacji i pomiaru prądu detektorów.



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego.



Rys. 5. Schemat elektryczny układu polaryzacji i pomiaru prądu detektora.

Akwizycja danych i ustawianie monochromatora odbywa się pod kontrolą programu **FOCON** (nowa wersja), napisanego w ramach pracy dyplomowej przez mgr inż. Mateusza Koconia.

Układy polaryzacji badanego detektora i pomiaru jego prądu, oraz sterownik silnika krokowego zamontowane są w kompletnym panelu, a wszelkie ustawienia wartości realizuje się poprzez oprogramowanie FOCON.

Badane detektory są mocowane w odpowiednim uchwycie. Zamocowany w uchwycie detektor, umieszczamy w komorze pomiarowej, na ławie optycznej bezpośrednio przy szczelinie wyjściowej monochromatora (Rys. 6). Uchwyt mocujemy na takiej wysokości w „koniku” ławy optycznej, aby powierzchnia czynna detektora znajdowała się na wysokości połowy szczeliny wyjściowej monochromatora. Następnie przy pomocy pokrętła (P) uchwytu pomiarowego ustawiamy tak detektor, aby był on maksymalnie oświetlony padającą z monochromatora wiązką, czyli aby prąd detektora był największy. Ustawienia tego dokonujemy dla długości fali, przy której spodziewamy się maksymalnej czułości fotodetektora.



Rys. 6. Montaż detektora na ławie optycznej.



Rys. 7. Ustawianie detektora względem szczeliny wyjściowej monochromatora.

Po ustawieniu detektora w optymalnej pozycji zamykamy komorę pomiarową i przystępujemy do właściwego cyklu pomiarowego.

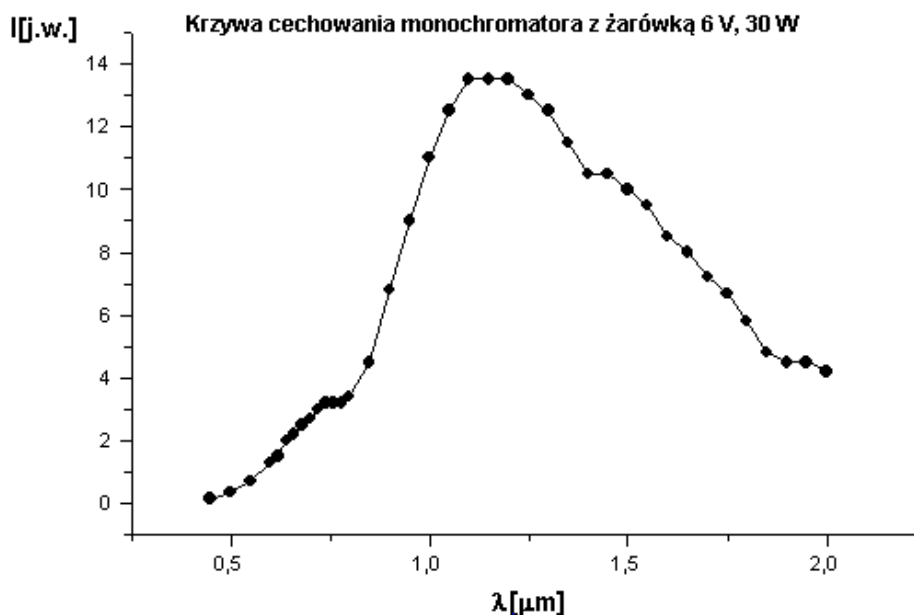
Kalibracja monochromatora

Prąd fotodetektora zależy nie tylko od długości padającej fali świetlnej, ale także od jej natężenia, dlatego sam pomiar prądu fotodetektora w funkcji długości fali nie jest wystarczający. Przyczyną tego jest fakt, że zastosowane w układzie pomiarowym źródło światła – żarówka – daje światło o natężeniu zmieniającym się w funkcji długości fali (promieniowanie rozgrzanego włókna wolframowego odpowiada w przybliżeniu widmu promieniowania ciała doskonale czarnego). Wielkość strumienia świetlnego F zależy od:

- szerokości szczeliny monochromatora,
- powierzchni czynnej fotodetektora,
- odległości detektora od szczeliny (natężenie światła maleje z kwadratem odległości) oraz
- od długości fali oświetlającej (natężenie zależy od długości fali dla źródła jakim jest żarówka).

Na stanowisku pomiarowym przeprowadza się pomiary względne. Przyjęto, że wielkość strumienia świetlnego jest tożsama z natężeniem padającego światła, wówczas otrzymywana czułość widmowa jest bezwymiarowa. Obliczając zaś względną czułość widmową, zastosowane uproszczenie przestaje mieć znaczenie.

Obecnie używana żarówka została zbadana bolometrem (przyrządem mierzącym natężenie światła, o czułości niezależnej od długości fali). Na rysunku 8 pokazano krzywą kalibracji monochromatora. Widzimy jak różne jest natężenie promieniowania dla różnych długości fali, maksimum natężenia przypada na zakres bliskiej podczerwieni.



Rys. 8. Krzywa cechowania monochromatora – natężenie światła w funkcji długości fali.

Przebieg ćwiczenia

Uruchomić stanowisko pomiarowe:

- włączyć oświetlenie skali monochromatora
- włączyć żarówkę – źródło światła w oświetlaczu monochromatora
- włączyć zasilanie silnika krokowego
- włączyć zasilanie układu polaryzacji i pomiaru prądu fotodetektora

e) uruchomić program FOCON

Korzystając z programu FOCON, przeprowadzić procedurę kalibracji długości fali, poprzez ustawienie początkowej wartości długości fali na wyjściu monochromatora ($0.45 \mu\text{m}$).

UWAGA: Po ustaleniu początkowego położenia monochromatora, nie należy zmieniać ręcznie wartości długości fali wybieranej przez monochromator. Będzie to skutkowało brakiem zgodności skali długości fali w programie FOCON z rzeczywistymi ustawieniami monochromatora.

A1 – Dla wybranego detektora określić warunki pomiaru:

- Początkową wartość długości fali (UWAGA: nie mniej niż $0.45 \mu\text{m}$!)
- Kończącą wartość długości fali
- Krok pomiaru (najlepiej $0.01 \mu\text{m}$)
- Ustawić wartość wzmocnienia toru pomiarowego

A2 – Zamocować detektor w uchwycie w komorze pomiarowej i przeprowadzić procedurę jego orientacji względem szczeliny wyjściowej monochromatora. (Ustawianie detektora przeprowadzić dla długości fali przy której spodziewamy się największej wartości sygnału pomiarowego, dla maksymalnego otwarcia szczeliny wyjściowej). Otwarcie szczeliny wyjściowej monochromatora ustawiamy przy pomocy pokrętki po lewej stronie aparatury.

A3 – Przy zamkniętej szczelinie wyjściowej monochromatora określić poziom sygnału zerowego (prąd ciemny detektora + ewentualne dryfy elektroniki).

A4 – zarejestrować i zapisać do pliku wyniki pomiaru czułości widmowej.

Pomiary przeprowadzić w/g zalecenia prowadzącego ćwiczenie asystenta, dla wybranych detektorów powtarzając dla każdego z nich punkty: **A1-A4**.

Opracowanie wyników – sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Skrócony opis stanowiska pomiarowego.
2. Opis zastosowanej procedury pomiarowej.
3. Wykresy czułości widmowej poszczególnych detektorów, wspólny wykres czułości względnych (unormowanych do 1).
4. Oszacowanie wartości przerwy energetycznej materiału, z którego wykonane są poszczególne detektory.
5. Komentarz, co do specyfiki badanych detektorów.
6. Wybrane fragmenty przykładowej noty katalogowej fotodetektora z badanej grupy, z komentarzem do najważniejszych parametrów.

Wyznaczenie przerwy energetycznej:

Najpierw należy odczytać długość fali λ_{foto} dla maksymalnej fotoczułości elementu. Następnie odczytaną wartość λ_{foto} podstawić do wzoru (1), określającego szerokość pasma wzbronionego:

$$E_g = \frac{c \cdot h}{\lambda_{\text{foto}}} \quad (1)$$

gdzie: E_g – energia pasma wzbronionego materiału badanego fotelementu, c – prędkość światła, h – stała Plancka, λ_{foto} – długość fali odpowiadająca maksymalnej czułości elementu (przed wstawieniem do wzoru zamienić długość fali na metry).

Literatura:

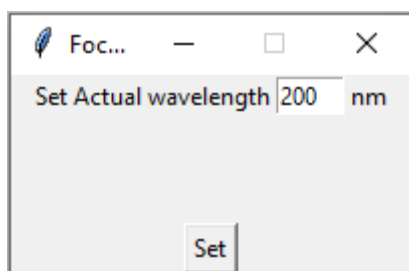
1. J. Tauc, „Zjawiska fotoelektryczne i termoelektryczne w półprzewodnikach”, PWN, Warszawa 1966
2. K. Booth, S. Hill, „Optoelektronika”, WKiŁ, Warszawa, 2001
3. J.I. Pankove, „Zjawiska optyczne w półprzewodnikach”, WNT, Warszawa, 1984

Program FOCON

Zadaniem programu FOCON jest sterowanie opisaną powyżej aparaturą stanowiska pomiarowego, pomiar prądu i napięcia fotodetektora dla różnych długości fali świetlnej monochromatora, wyznaczanie charakterystyk prądowo-napięciowych, obliczanie względnej prądowej czułości widmowej oraz archiwizacja otrzymanych wyników. Wszystkie dane są obrazowane na wykresach, z możliwością zapisu do pliku csv.

Okno startowe

Po podpięciu sterownika, oraz jego uruchomieniu przełącznikiem zasilania, należy włączyć program FOCON.exe. W przypadku poprawnego wykrycia układu wykonawczego urządzenie poprosi o podanie aktualnej długości fali:



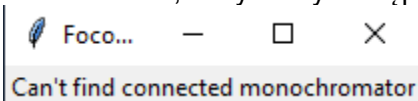
Rys. 1 – wprowadzenie wartości realnej długości fali

W tym momencie silnik jest wyłączony i ręcznie można obracać pryzmat, należy manualnie ustawić najbliższą długość fali oraz potwierdzić ją w oprogramowaniu:



Rys. 2 – ręczne ustawienie długości fali monochromatora

W przypadku braku komunikacji ze sterownikiem, otrzymamy następujący komunikat:



Rys. 3 – błąd połączenia z monochromatorem

Należy wówczas sprawdzić połączenie USB oraz zasilanie na przykład przez obserwację wbudowanych w urządzeniu diod LED oraz zrestartować program FOCON.

Okno pomiaru – czułość

Oknem, które pojawi się po inicjalizacji, jest okno pomiaru czułości fotodetektora. Pasek u góry zawiera pola konfiguracyjne dla pomiaru:

Wavelength min: 400 nm	Wavelength max: 1800 nm	Step: 10 nm	Voltage: 2 V	I max: 25 mA	I min: -25 mA	Sample Average: 20	Stop	Trigger Measurement
------------------------	-------------------------	-------------	--------------	--------------	---------------	--------------------	------	---------------------

Rys. 4 – Parametry pomiaru czułości fotodetektora

Wavelength min – długość fali, od której urządzenie zaczyna pomiar

Wavelength max – długość fali, na której urządzenie zakończy pomiar

Step – krok, z jakim będzie wykonywany pomiar. Nie należy ustawiać zbyt niskiej wartości, pomiar wysokiej dokładności może trwać kilkanaście minut.

Voltage – napięcie polaryzacji fotodetektora, dla którego będą wykonywane pomiary. Przed ustawieniem tej wartości, należy mieć świadomość, jaki fotodetektor jest mierzony oraz jaka jest jego polaryzacja (kierunek podpięcia). Przy ustawieniu złej wartości fotodetektor ulega uszkodzeniu. W przypadku braku pewności, należy wcześniej wykonać pomiar U/I.

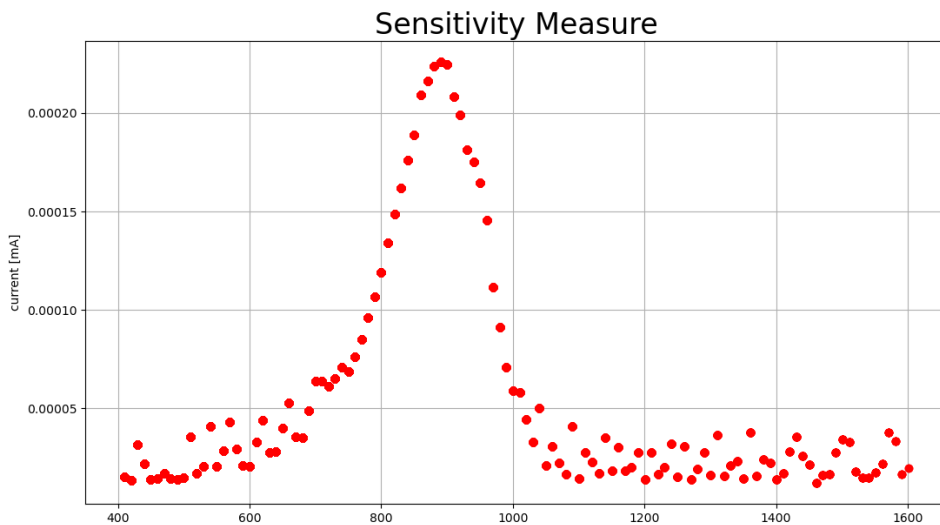
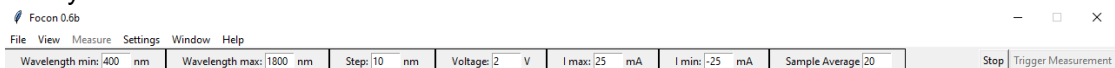
Step – krok, z jakim będzie wykonywany pomiar. Nie należy ustawiać zbyt niskiej wartości, pomiar wysokiej dokładności może trwać kilkanaście minut.

I max – prąd dodatni, dla którego zadziała zabezpieczenie nadprądowe

I min – prąd ujemny, dla którego zadziała zabezpieczenie nadprądowe

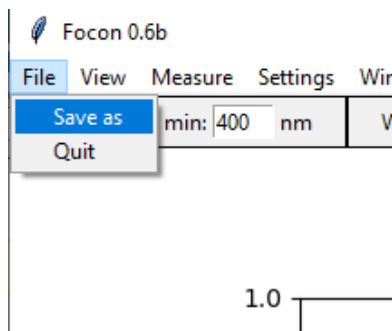
Sample average – ilość próbek, które podlegają uśrednieniu na poziomie sprzętowym

Po sprawdzeniu dokładności, możemy uruchomić pomiar przyciskiem **'Trigger measurement'**. Po jego wykonaniu, można zaobserwować charakterystykę widmową fotodetektora. W razie problemu z pomiarem, aktywny jest przycisk **'Stop'**, który natychmiastowo kończy pomiar. Silnik pozostaje zablokowany.



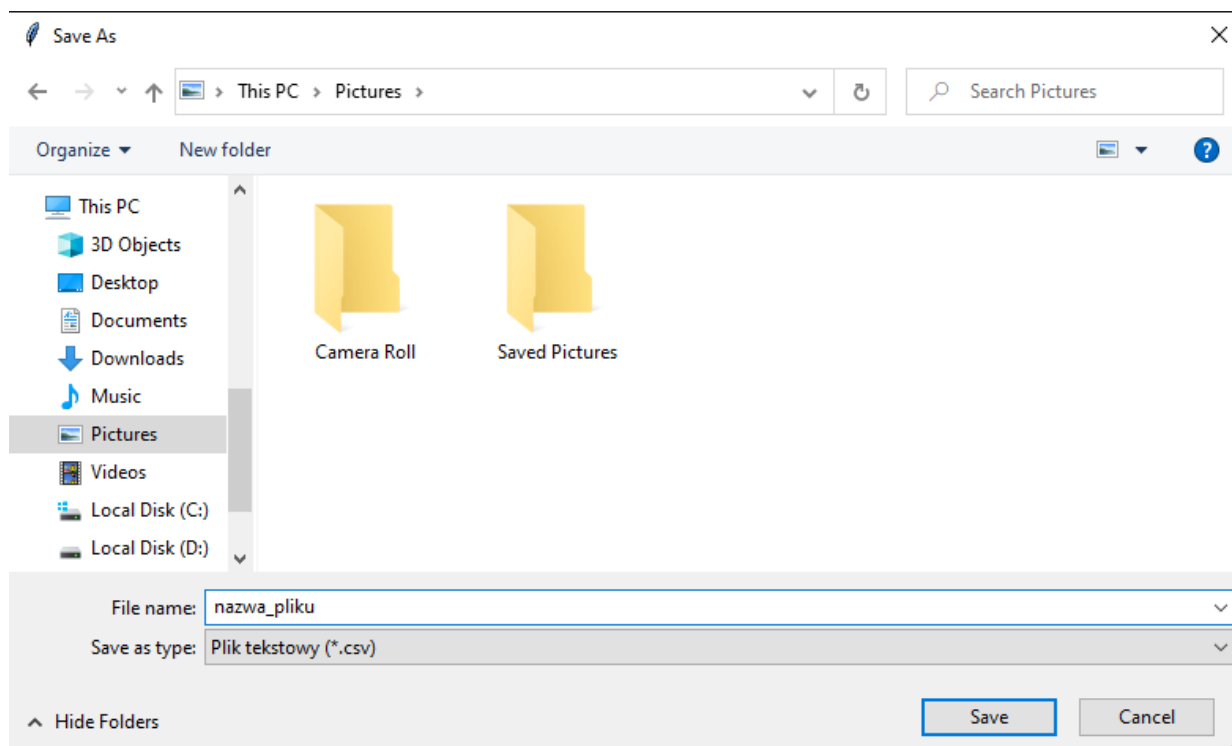
Rys. 5 – Przykładowa charakterystyka czułości fotodetektora

Zapisanie pomiarów można wykonać z wykorzystaniem funkcji z lewym górnym rogu okna:



Rys. 6 – Opcja zapisu pomiarów

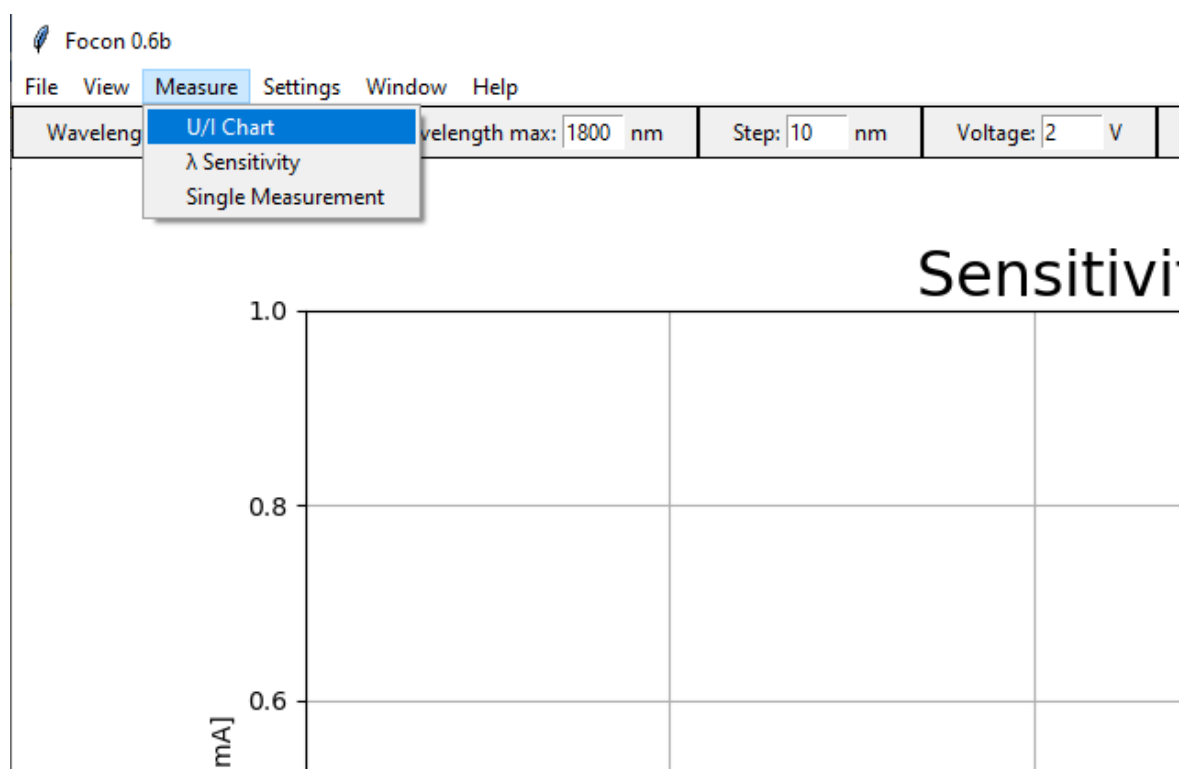
Pojawi się okno, służące do zapisu pliku w formacie .csv:



Rys. 7– Zapis pomiarów fotodetektora

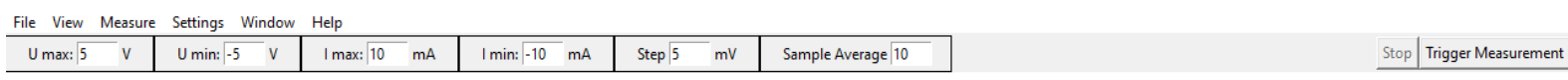
Okno pomiaru – charakterystyki prąd/napięcie

Aby przełączyć okno pomiaru należy rozwinąć listę 'Measure' u góry okna:



Rys. 8 – Zmiana trybu pomiarowego

U góry pojawią się pola konfiguracyjne dla pomiaru:



Rys. 9 – Parametry pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych

U max – Napięcie dodatnie, na którym kończy się pomiar. Nie należy ustawiać zbyt wysokiej wartości, możliwość uszkodzenia czujnika prądem lawinowym.

U min – Napięcie ujemne, na którym kończy się pomiar. Nie należy ustawiać zbyt wysokiej wartości, możliwość uszkodzenia czujnika prądem lawinowym.

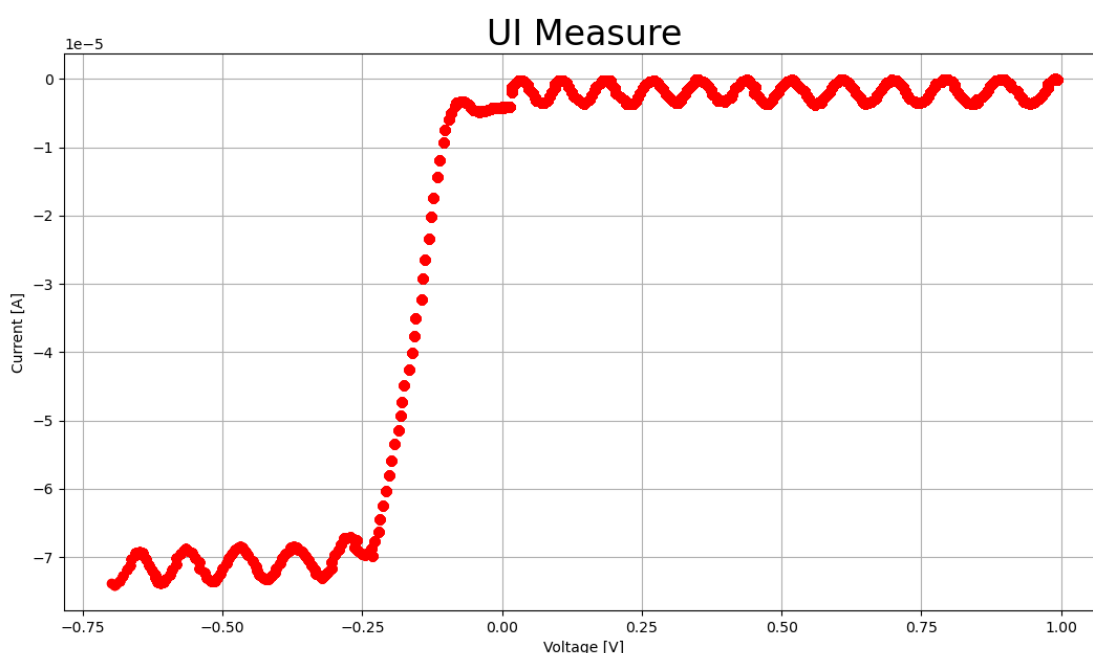
I max – Prąd dodatni, na którym kończy się pomiar. Nie należy ustawiać zbyt wysokiej wartości, możliwość uszkodzenia/przegrzania czujnika

I min – Prąd ujemny, na którym kończy się pomiar. Nie należy ustawiać zbyt wysokiej wartości, możliwość uszkodzenia/przegrzania czujnika

Step – krok, z jakim będzie wykonywany pomiar. Nie należy ustawiać zbyt niskiej wartości, pomiar wysokiej dokładności może trwać kilkanaście minut.

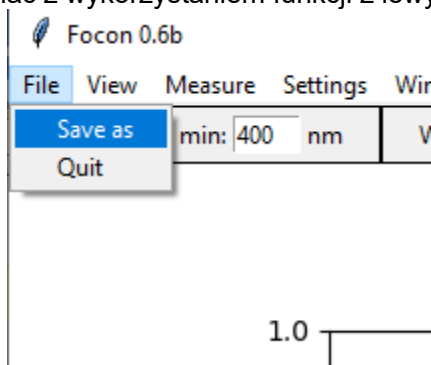
Sample average – ilość próbek, które podlegają uśrednieniu na poziomie sprzętowym

Po sprawdzeniu dokładności, możemy uruchomić pomiar przyciskiem **'Trigger measurement'**. Po jego wykonaniu, można zaobserwować charakterystykę prądowo-napięciową fotodetektora. Wszystkie pomiary są dokonywane od 0 do U max, następnie od 0 do U min. W razie problemu z pomiarem, aktywny jest przycisk **'Stop'**, który natychmiastowo kończy pomiar.



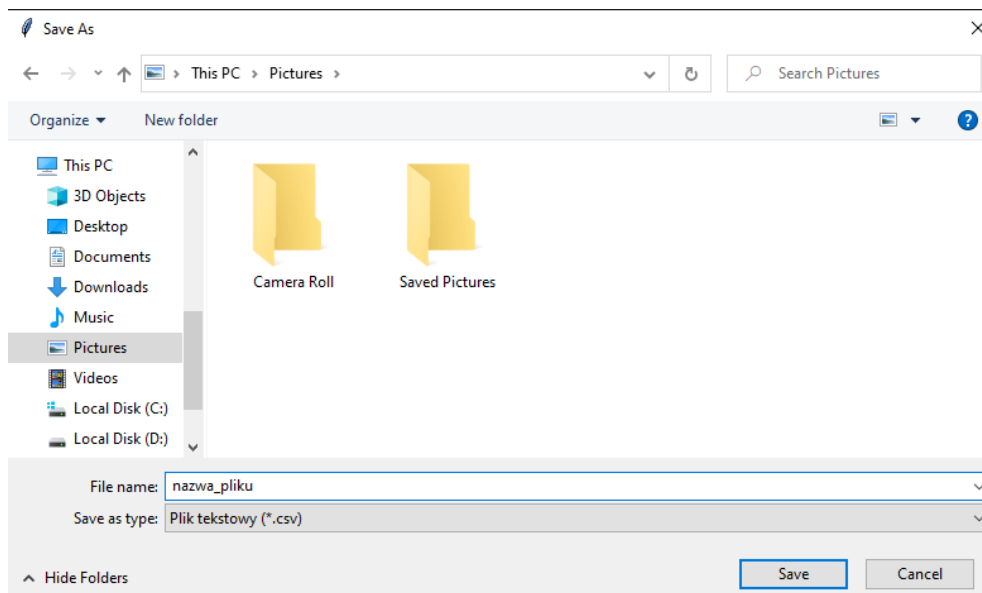
Rys. 10 – Przykładowy pomiar prąd-napięcie

Zapisanie pomiarów można wykonać z wykorzystaniem funkcji z lewym górnym rogu okna:



Rys. 11 – Opcja zapisu pomiarów

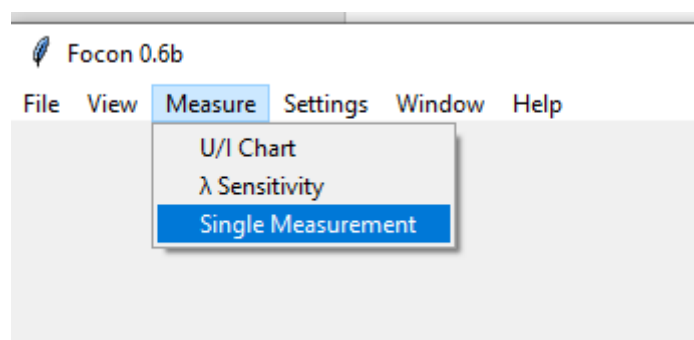
Pojawi się okno, służące do zapisu pliku w formacie .csv:



Rys. 12– Zapis pomiarów fotodetektora

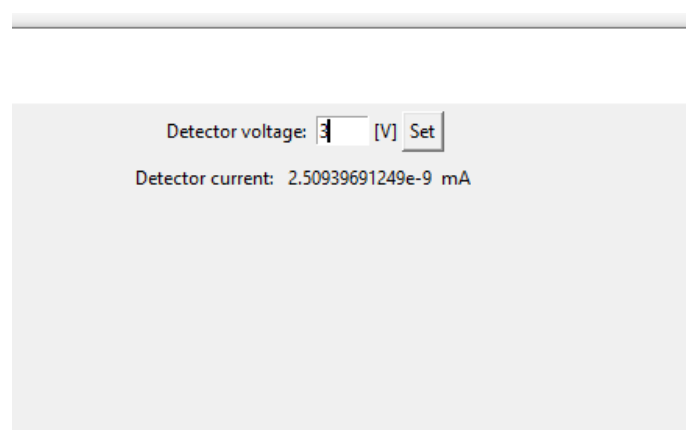
Okno pomiaru – prąd ciemny

Aby przełączyć okno pomiaru należy rozwinąć listę '**Single measurement**' u góry okna:



Rys. 13 – Zmiana trybu pomiarowego

Po dobraniu napięcia polaryzacji, układ będzie dokonywał ciągłego pomiaru prądu fotodetektora:



Rys. 14 – Pomiar prądu przy stałym napięciu polaryzacji

Obserwując tą wartość, należy ustawić czujnik względem wiązki monochromatora przy pomocy śruby adaptera, tak aby ten prąd był jak największy. Pokazano to na rysunku 15 i 16:



Rys. 15 – Czujnik nie położony osiowo względem wiązki



Rys. 16 – Regulacja położenia czujnika względem wiązki