



WYKŁAD 9

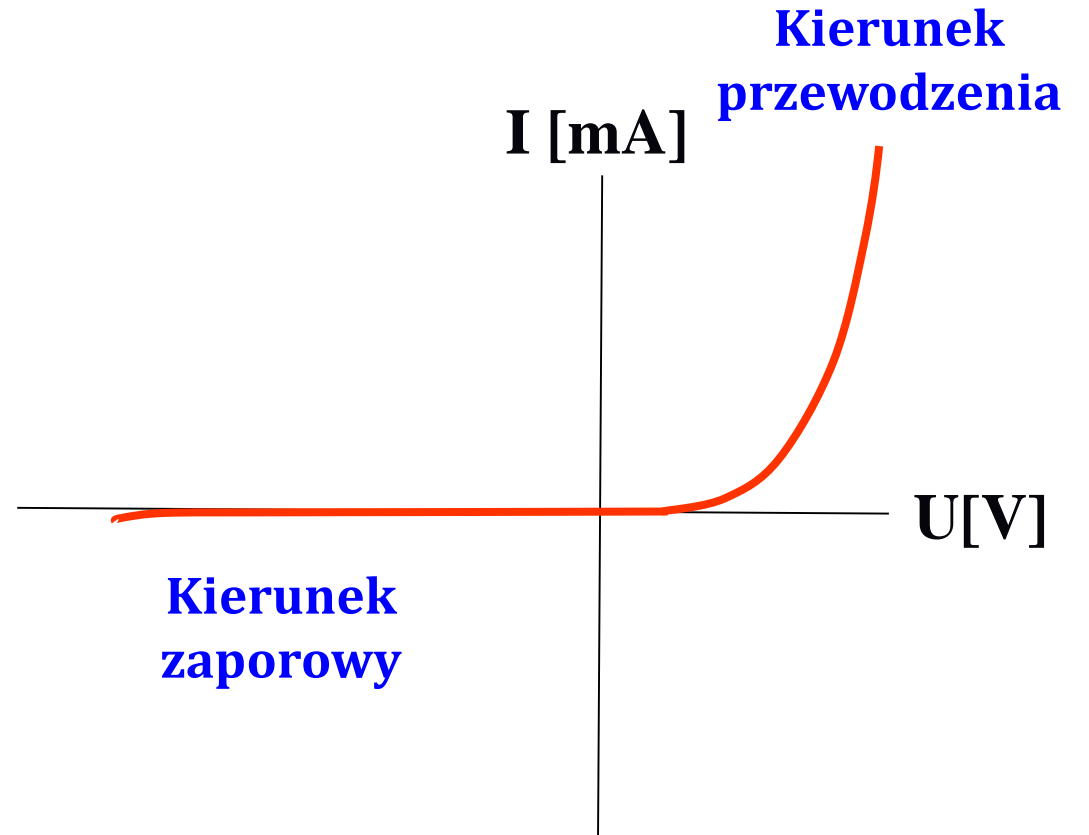
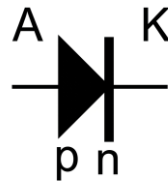
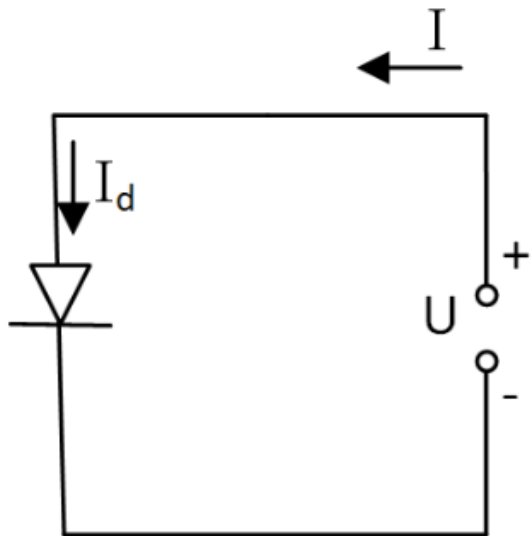
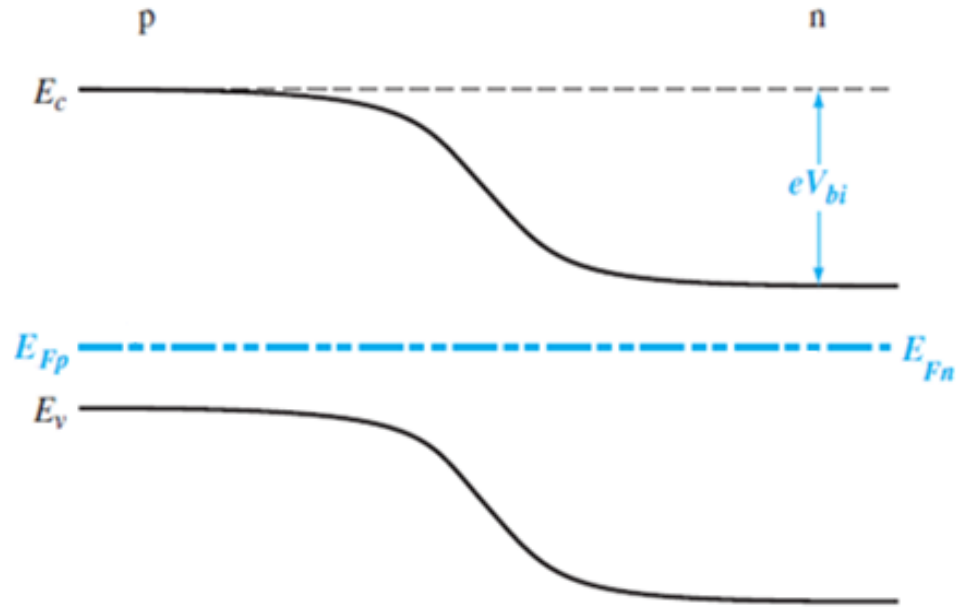
„Jasna” charakterystyka I-V złącza p-n. Model dwudiodowy złącza p-n. Sprawność ogniwa, prąd zwarcia i napięcie rozwarcia oraz ich zależności od natężenia światła i temperatury.

Eunika Zielony

Wykład na podstawie:

1. <https://www.pveducation.org/>
2. <https://epodreczniki.open.agh.edu.pl/handbook/35/module/775/reader>
3. **S. M. Sze and Kwok K. Ng**, „*Physics of Semiconductor Devices*”, 3rd edition, wyd.: John Wiley & Sons, Inc. Publication, New Jersey, 2007.

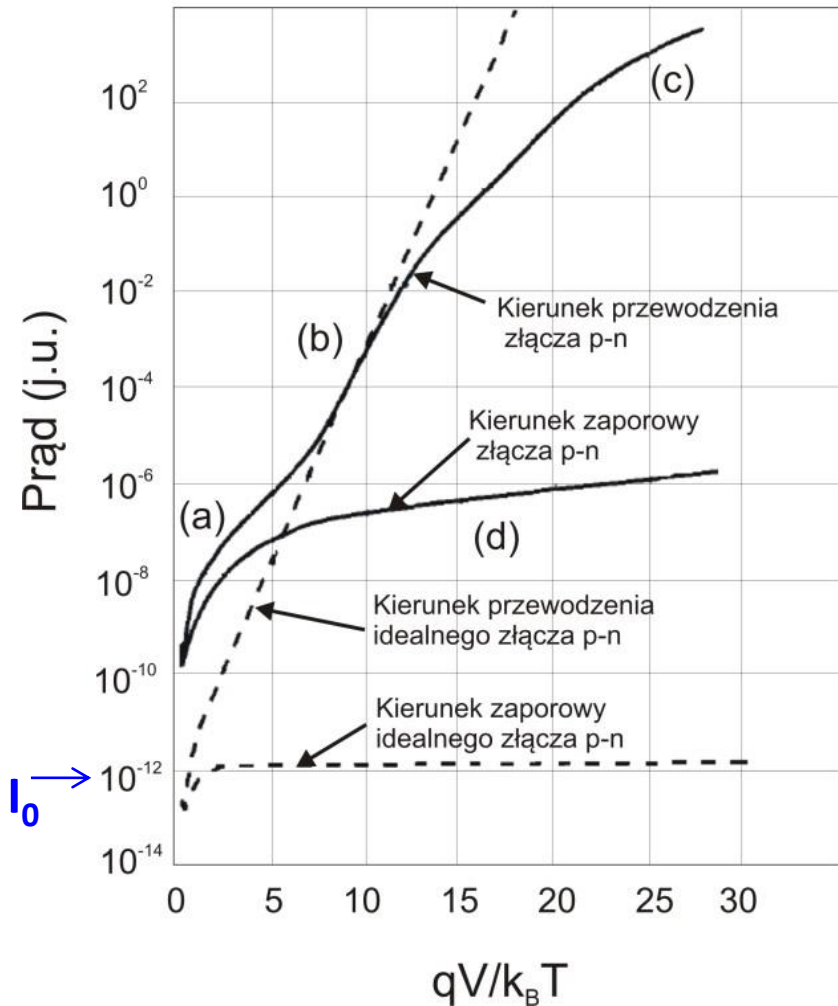
Idealne złącze p-n → idealna dioda półprzewodnikowa



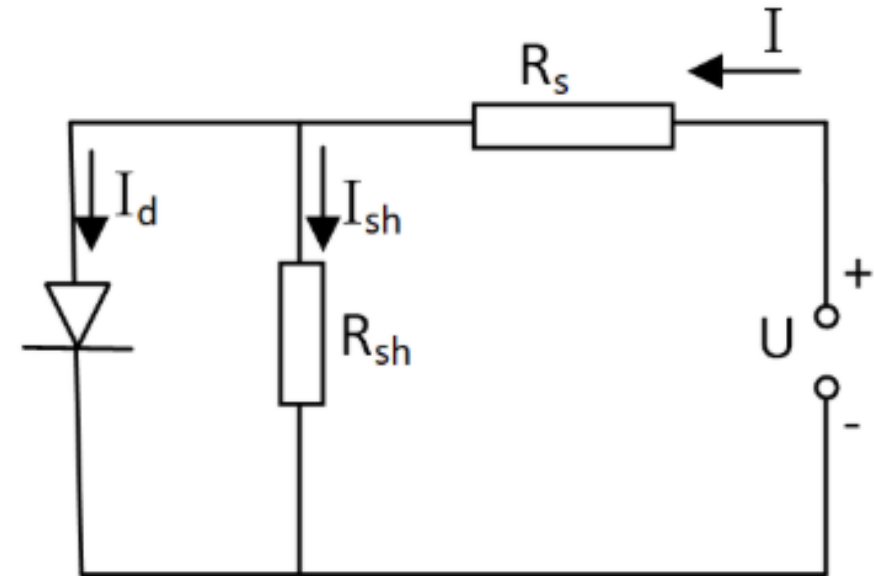
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]$$

Tutaj $n = 1$

Rzeczywiste złącze p-n → rzeczywista dioda półprzewodnikowa



W rzeczywistym złączu należy uwzględnić rezystancję szeregową R_s i rezystancję upływu R_{sh} .

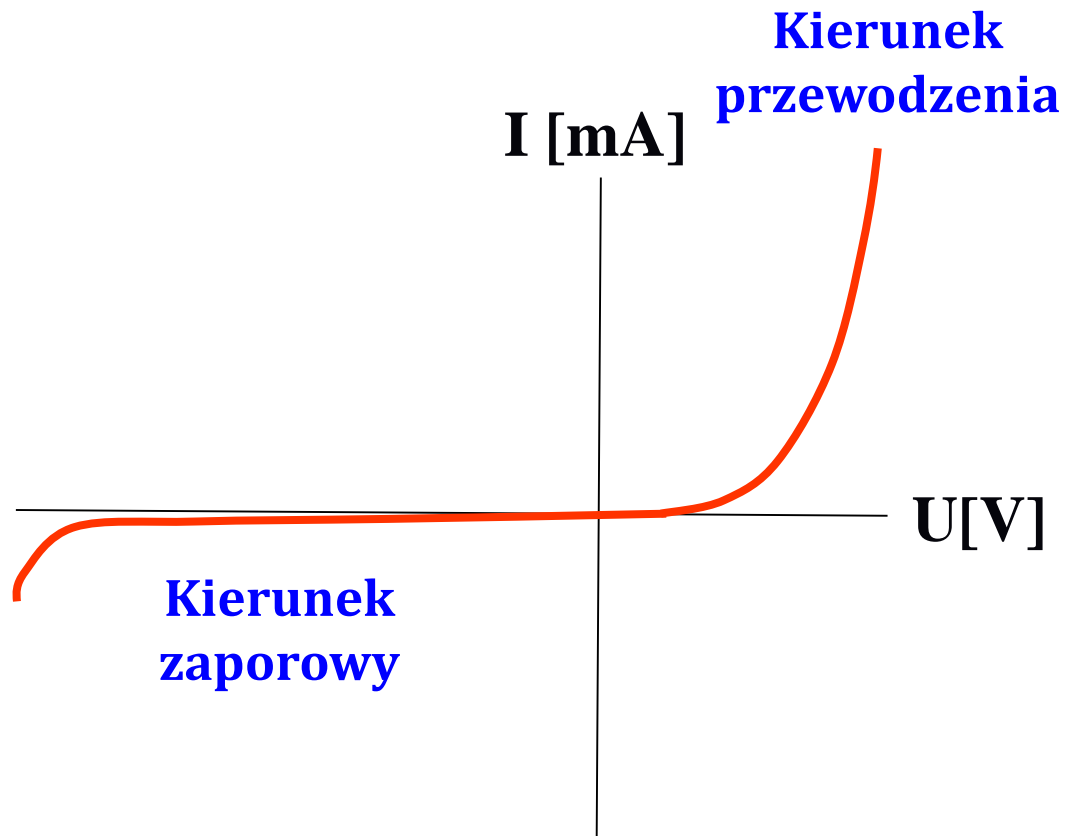


Schemat zastępczy diody prostowniczej (złącza p-n) używany do analizy jej charakterystyk elektrycznych: R_{sh} – **opornik bocznikujący** (inaczej **oporność upływu**) reprezentująca rezystencję wynikającą z **powierzchniowej rekombinacji nośników ładunku**, R_s – **opornik zastępujący sumę oporów szeregowych** w obwodzie zewnętrznym (rezystancja szeregową).

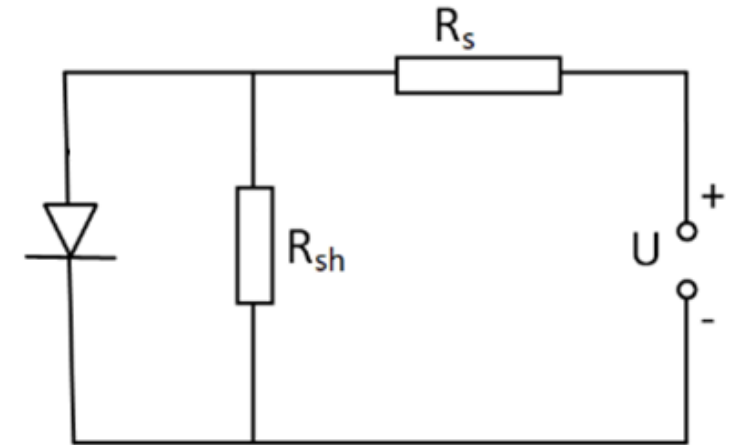
$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{kT} \right) - 1 \right] - \frac{U}{R_{sh}}$$

„Ciemna” charakterystyka I-V złącza p-n

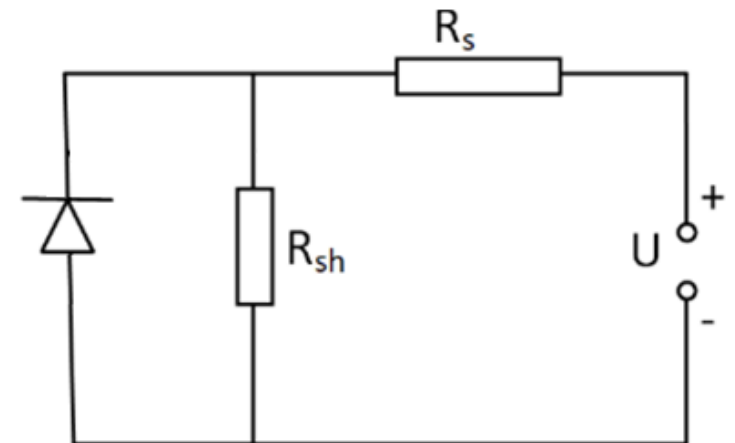
„Ciemna” charakterystyka prądowo-napięciowa nieoświetlonego złącza p-n



Kierunek przewodzenia



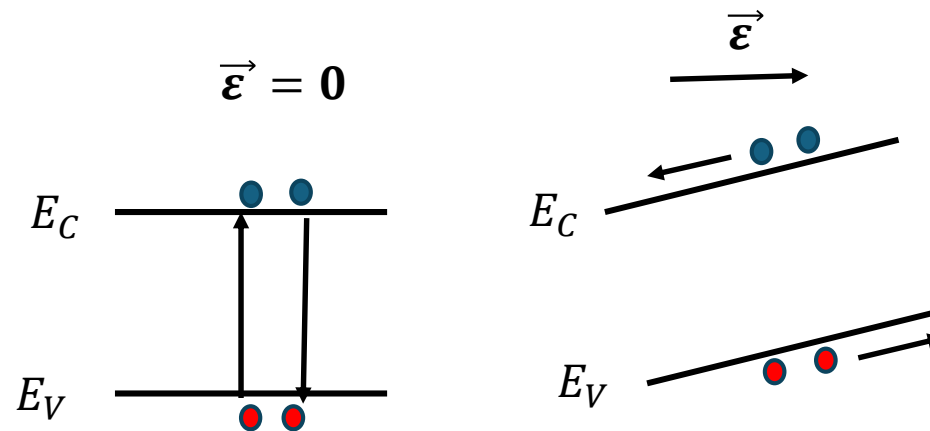
Kierunek zaporowy



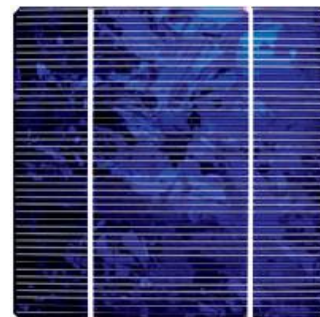
Efekt fotowoltaiczny – tj. fotoelektryczny wewnętrzny

Ogniwo słoneczne jest przyrządem półprzewodnikowym, w którym zachodzi proces zamiany energii padających na nie fotonów w energię elektryczną. Podstawą ich działania jest **efekt fotowoltaiczny (tj. fotoelektryczny wewnętrzny)**. Aby ten efekt mógł zajść w złączu p-n muszą być spełnione określone warunki:

- 1) Padające światło musi być zaabsorbowane przez złącze p-n: $h\nu \geq E_g$
- 2) Pod wpływem promieniowania muszą być generowane w półprzewodniku mniejszościowe nośniki ładunku dodatniego i ujemnego
- 3) Wygenerowane nośniki mniejszościowe muszą być rozdzielone przez wbudowane pole elektryczne w złączu p-n → separacja nośników zachodzi dzięki wbudowanemu polu w złączu → zatem to pole musi mieć duże natężenie

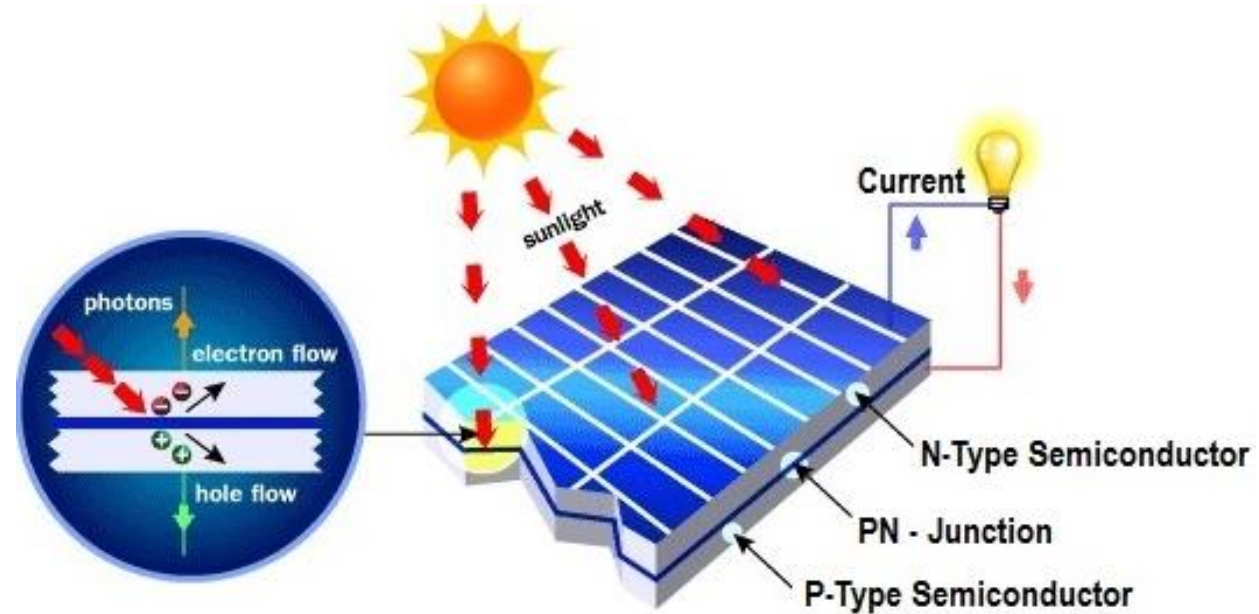
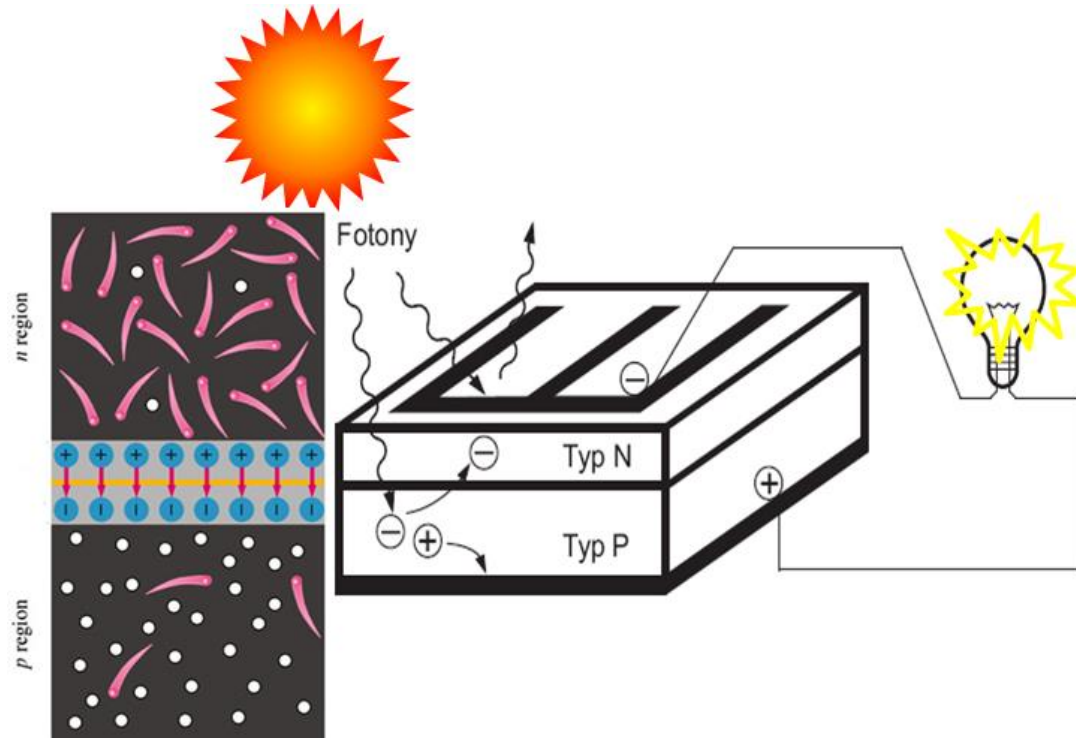


- 4) Generowane swobodne nośniki ładunku muszą zachować swoją ruchliwość dostatecznie długo, tak aby zdążyły być rozdzielone przez pole elektryczne złącza p-n zanim zrekombinują do stanu podstawowego



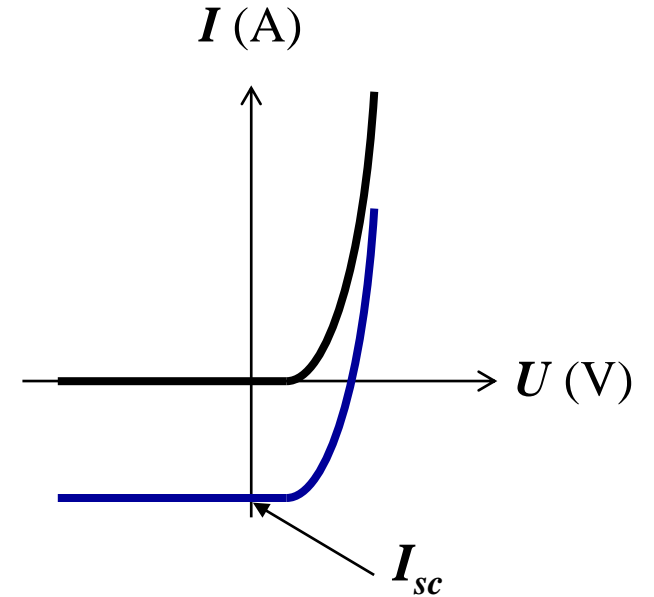
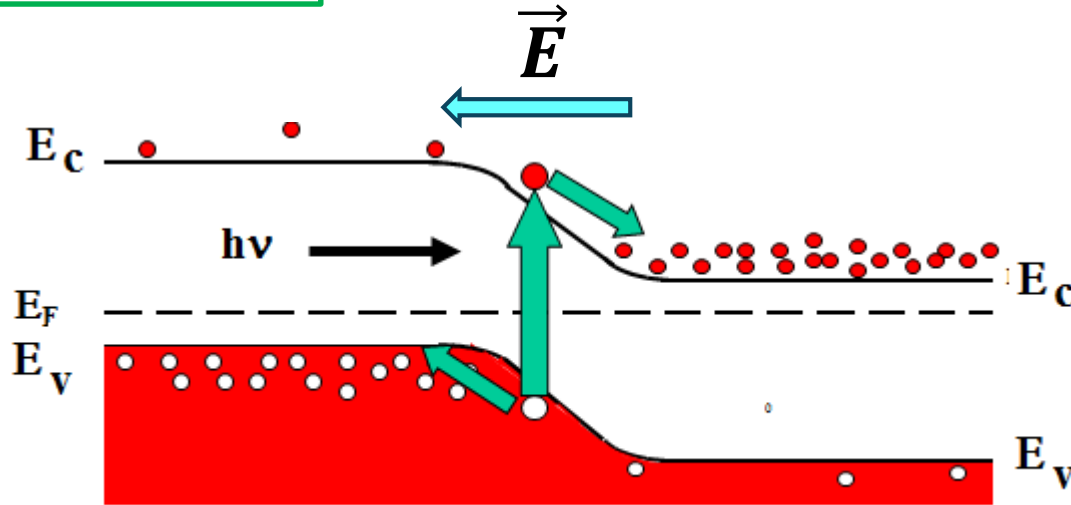
Efekt fotowoltaiczny w ujęciu makroskopowym

Światło o energii $h\nu \geq E_g$ jest absorbowane, tworzą się pary elektron-dziura, które są separowane przez pole w złączu i transportowane przez złącze – płynie wówczas prąd zwarcia, a na krańcach złącza wytwarza się różnica potencjałów.



Efekt fotowoltaiczny w ujęciu **mikroskopowym**

Złącze jest zwarte ($U_{zew} = 0$)



W oświetlonym ogniwie, które jest zwarte, wewnętrzne pole elektryczne nie zmienia się. Światło tworzy jednak nowe nośniki ładunku. Pole to przechwytuje je i transportuje w odpowiednich kierunkach (elektrony do typu n, dziury do typu p). Ponieważ ten dodatkowy ruch nośników wywołany światłem nie jest niczym hamowany, płynie **prąd zwarcia I_{sc}** .

$$I_{sc} = qN_{ph}(E_g) = \frac{qP}{h\nu} \approx P$$

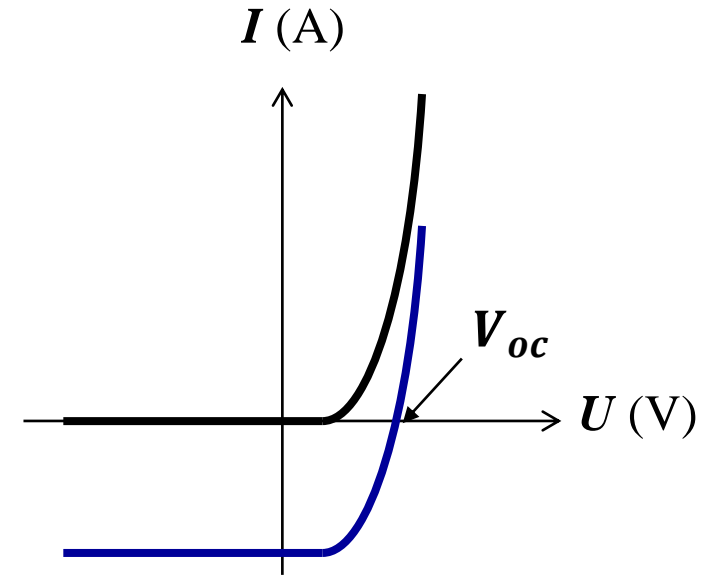
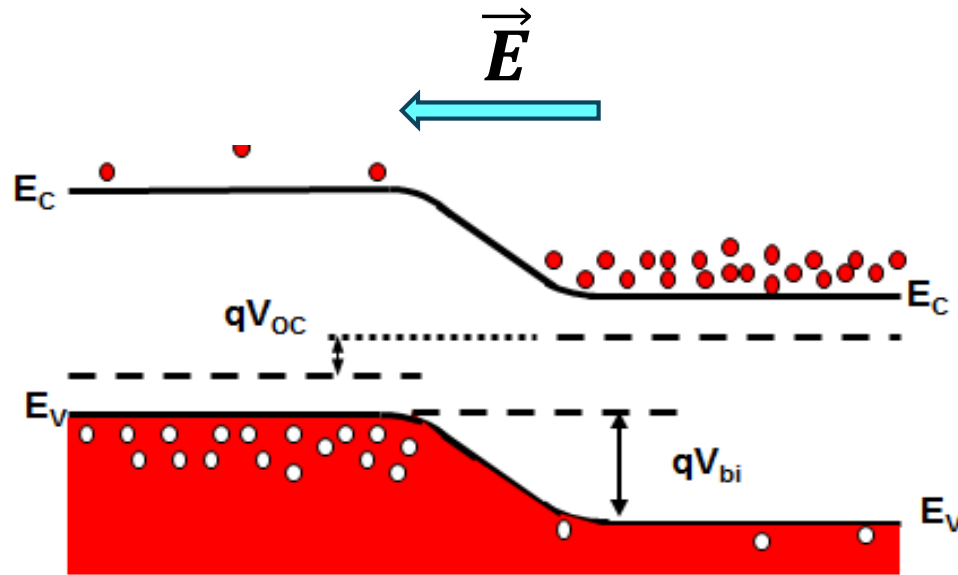
N_{ph} - liczba fotonów o energii równej energii przerwy wzbronionej (E_g) półprzewodnika.



Prąd zwarcia (I_{sc}) jest proporcjonalny do strumienia padającego promieniowania.

Efekt fotowoltaiczny w ujęciu **mikroskopowym**

Złącze jest rozwarne ($I_{zew} = 0$)



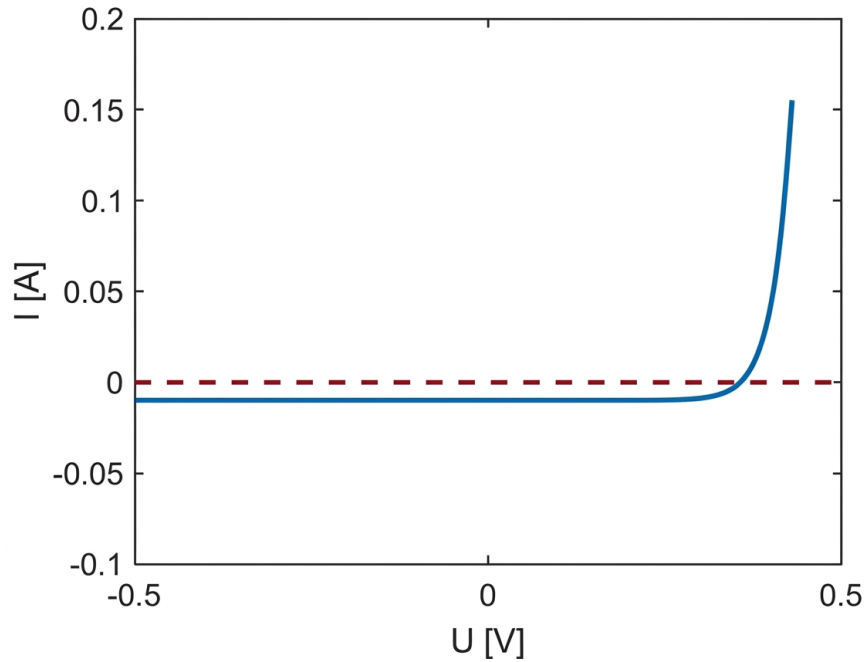
Wygenerowane światłem elektrony płyną do obszaru n a dziury do obszaru p. W wyniku tego obszar typu n ładuje się ujemnie a typu p dodatnio. Taka polaryzacja obszarów złącza jest równoważna polaryzacji w kierunku przewodzenia. Wartość napięcia, które wynika z różnicy potencjałów na krańcach złącza nazywa się **napięciem rozwarcia V_{oc}** .

Napięcie rozwarcia sprawia, że pojawia się tzw. prąd ciemny (I_d), równoważący prąd zwarcia. Tzn. **napięcie V_{oc} wymusza przepływ prądu ciemnego** wewnątrz ogniwa, ale **w przeciwnym kierunku**. Prądy zwarcia i ciemny stają się sobie równe – czyli tyle samo ładunku słońce generuje i kieruje w jedną stronę, co napięcie V_{oc} „zawraca” w drugą.

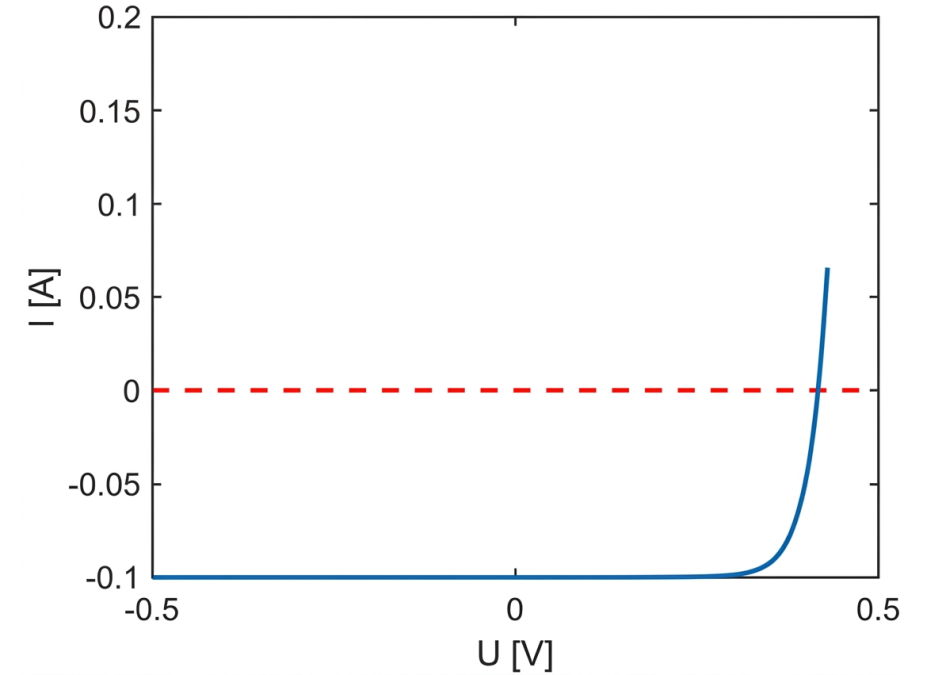
$$I_{sc} = I_d$$

„Jasne” charakterystyki I-V fotodiody i ogniwa słonecznego – przypadek idealny

Dla fotodiody

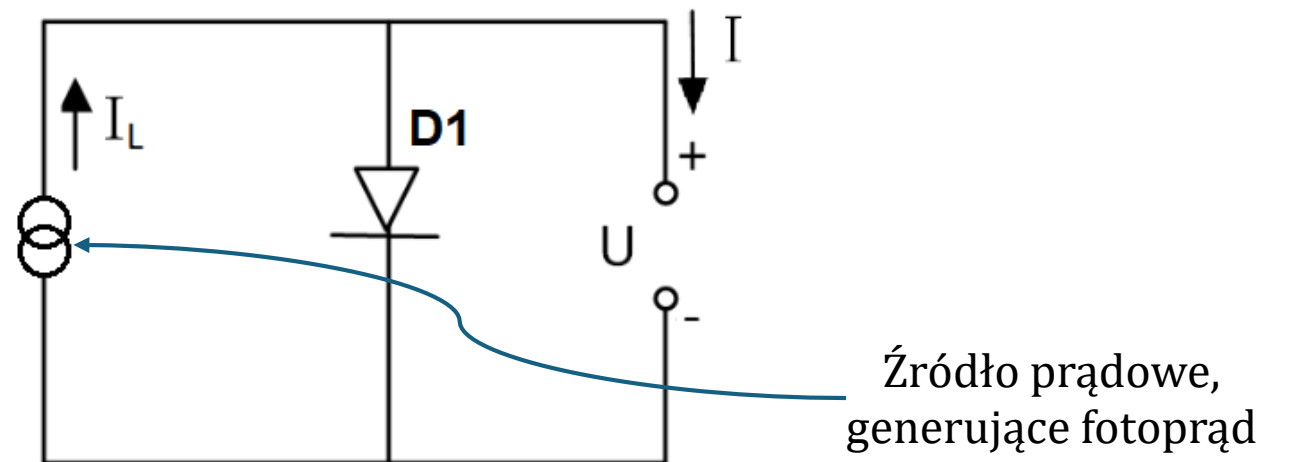


Dla ogniwa



$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L$$

I_L - prąd fotogeneracji (fotoprąd)



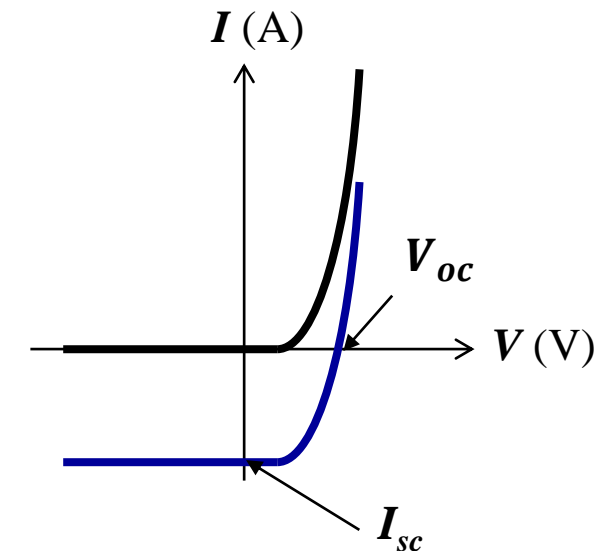
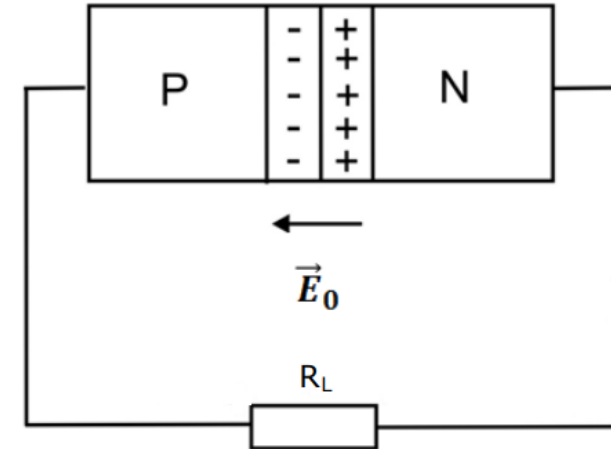
Fotodioda versus ogniwo słoneczne

OGNIWO SŁONECZNE

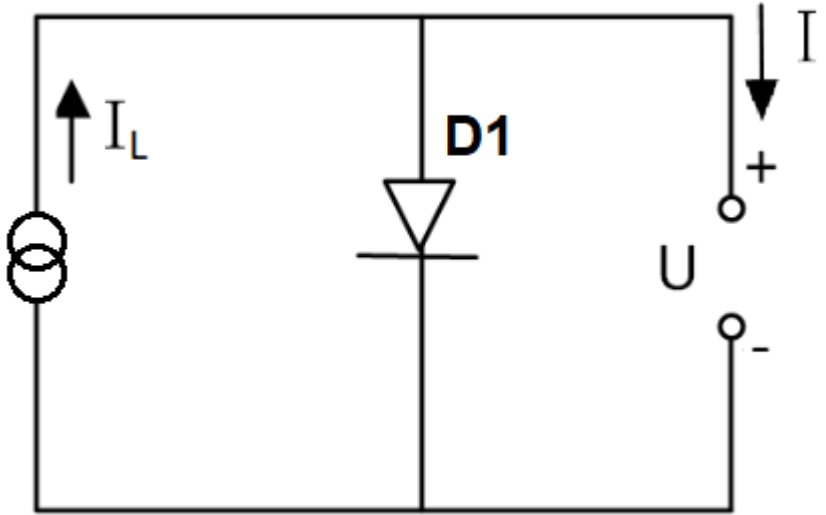
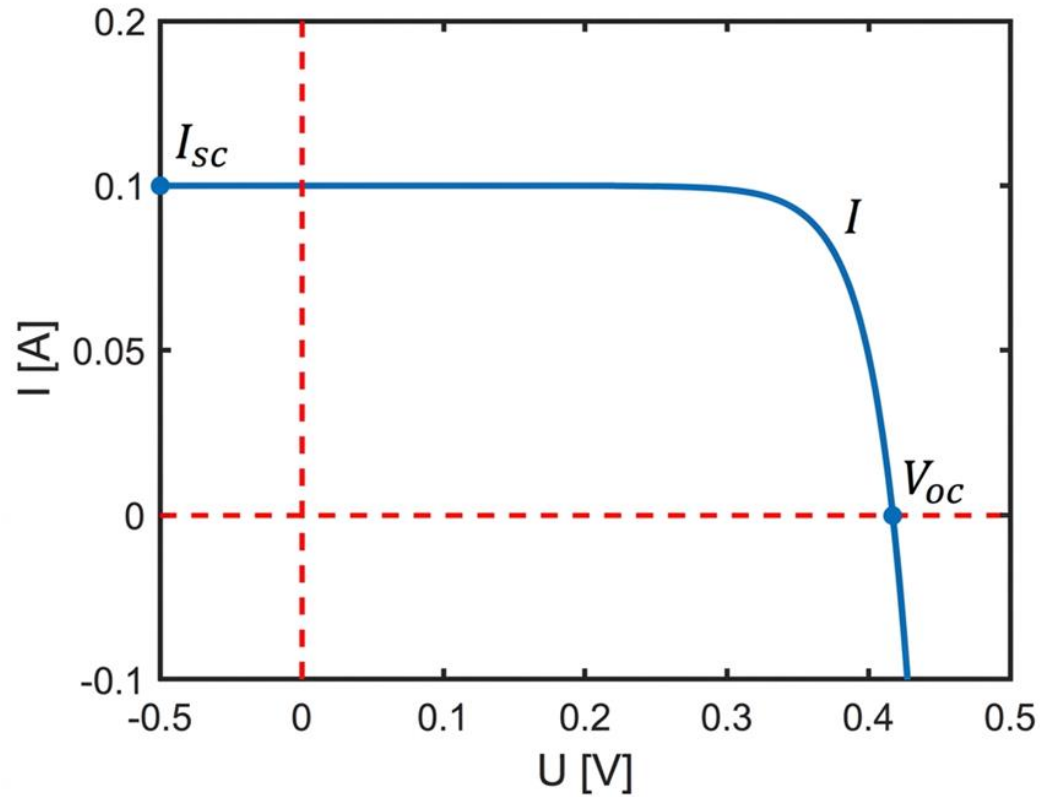
- Przyrząd, który zamienia energię słoneczną w energię elektryczną.
- Jest podobne do baterii, bo dostarcza mocy prądu stałego.
- Różni się tym od zwykłej baterii, że napięcie które wytwarza zależy od oporności obciążenia.

FOTODIODA

- Przyrząd, który jest stosowany jako czujnik promieniowania elektromagnetycznego:
- Pobiera moc z promieniowania elektromagnetycznego.



„Jasna” charakterystyka I-V idealnego ogniwa – generacja mocy

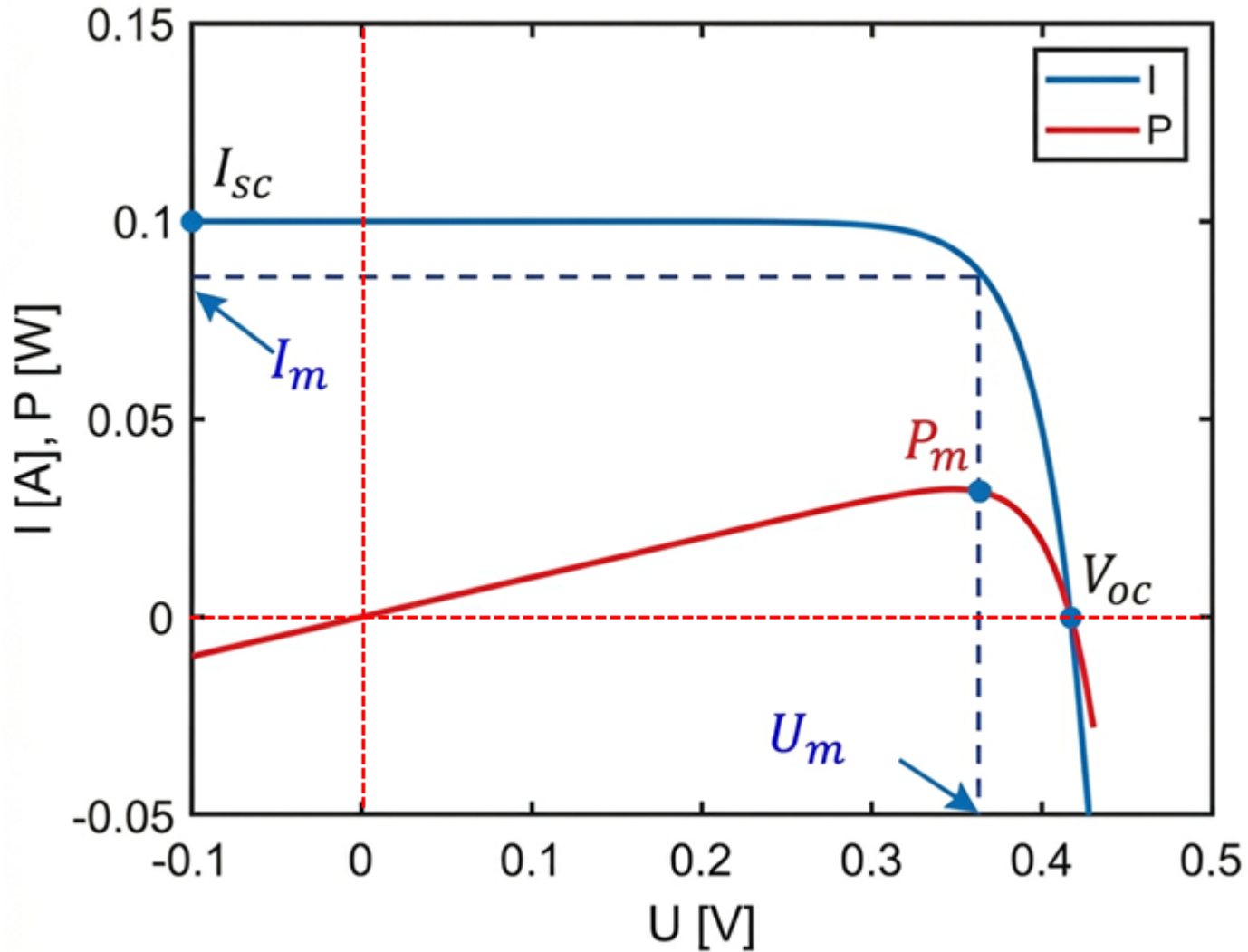


$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]$$



Uwaga: odwrócona charakterystyka I-V, gdyż ogniwo generuje moc elektryczną, podczas gdy fotodioda pobiera moc pochodzącą z padającego na nią promieniowania.

Wybrane parametry ogniwa z „jasnej” charakterystyka I-V



Współczynnik wypełnienia
(ang. fill factor):

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

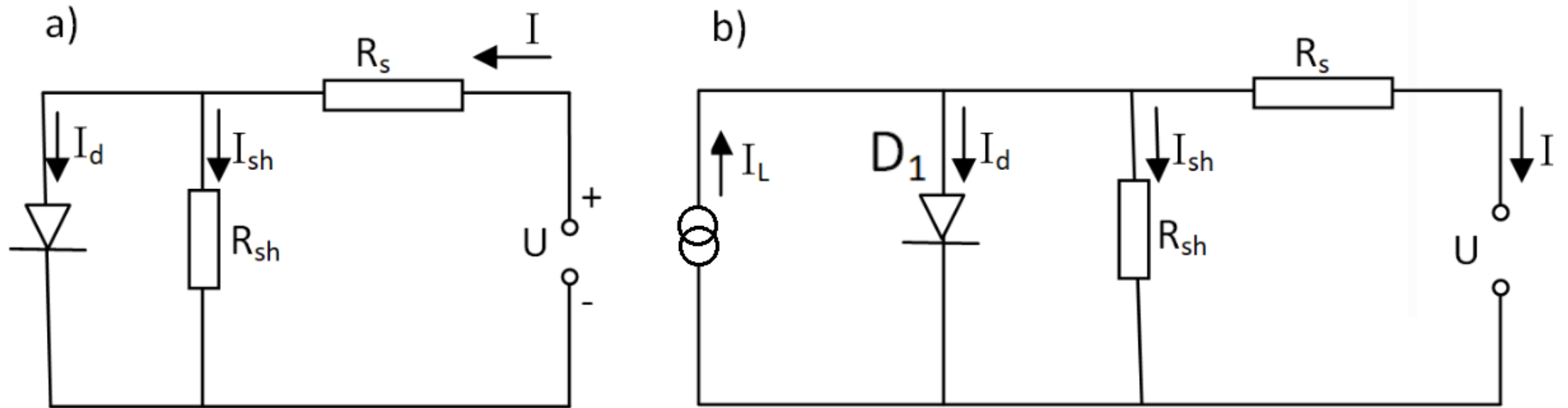
punkt mocy maksymalnej: $P_m = I_m \cdot V_m$

Sprawność (ang. efficiency):

$$\eta = FF \cdot \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{A \cdot P_{in}}$$

A – powierzchnia ogniwa, P_{in} – moc wejściowa
(moc światła padającego na ogniwo)

Modelowanie ogniw słonecznych – model jednodiodowy

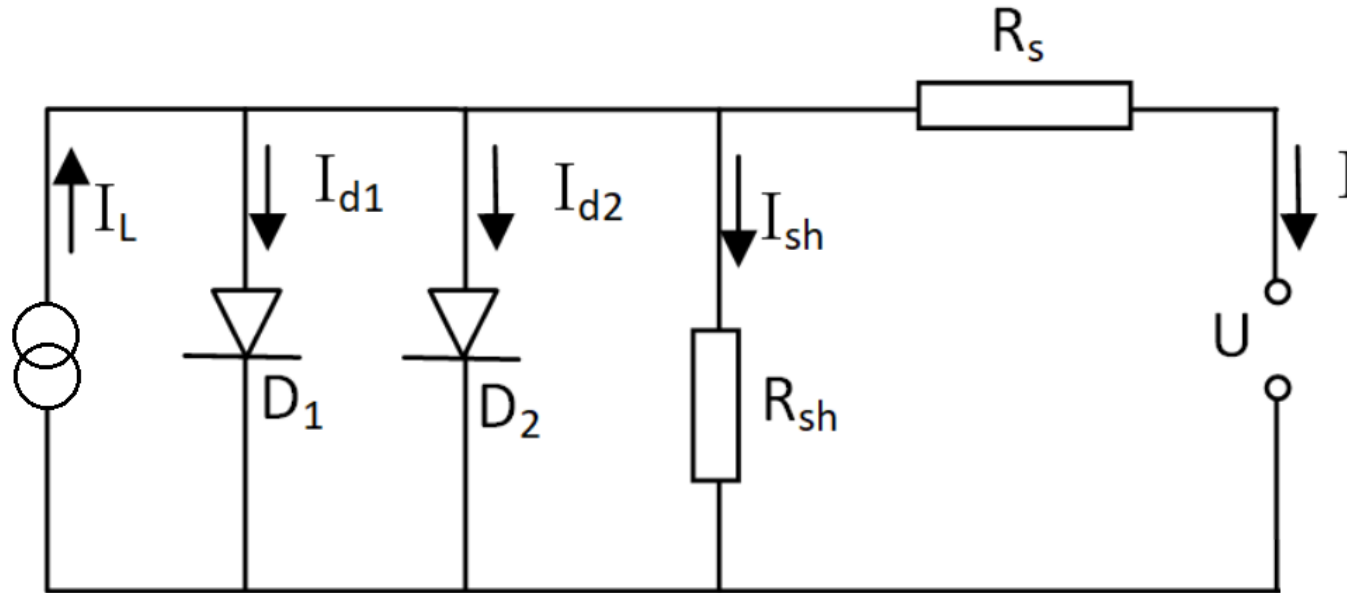


Rys. Schemat zastępczy: a) diody prostowniczej, b) ogniwa słonecznego (diody fotowoltaicznej). Obwody zastępcze różnią się tym, że dla diody fotowoltaicznej występują dodatkowo **źródła generujące prąd I_L pod wpływem promieniowania słonecznego**. W idealnym przypadku prąd $I_L = I_{SC}$:

$$I = I_{SC} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{kT} \right) \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}$$

Tutaj: R_s – rezystancja szeregową, R_{sh} – oporność upływu (zarówno R_s jak i R_{sh} są tzw. opornościami pasożytniczymi), **D_1 – dioda o współczynniku idealności $n = 1$** , I_{SC} – prąd zwarcia, I_0 – prąd nasycenia płynący przez diodę D_1 (prąd ciemny, związany z dyfuzją nośników większościowych).

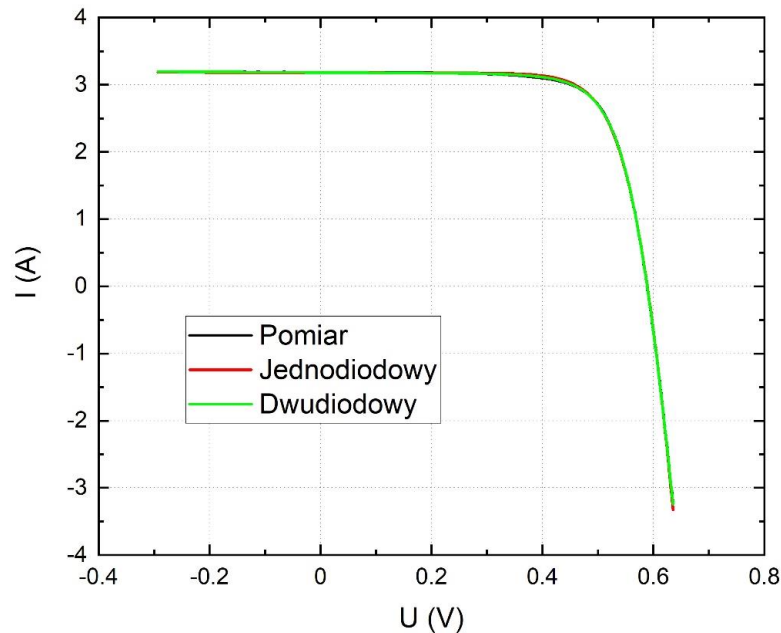
Modelowanie ogniw słonecznych - model dwudiodowy



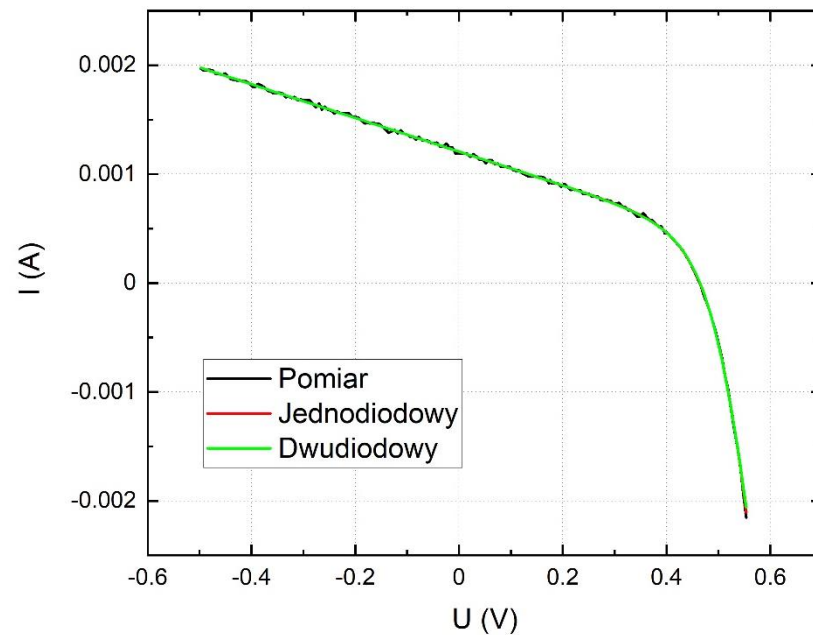
$$I = I_{sc} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{kT} \right) \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{2kT} \right) \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}$$

Tutaj: D_1 - dioda o współczynniku idealności $n = 1$, D_2 - dioda o współczynniku idealności $n = 2$, I_{01} - prąd nasycenia płynący przez diodę D_1 (prąd ciemny, związany z dyfuzją nośników większościowych); I_{02} - prąd nasycenia płynący przez diodę D_2 (prąd ciemny, związany z rekombinacją nośników).

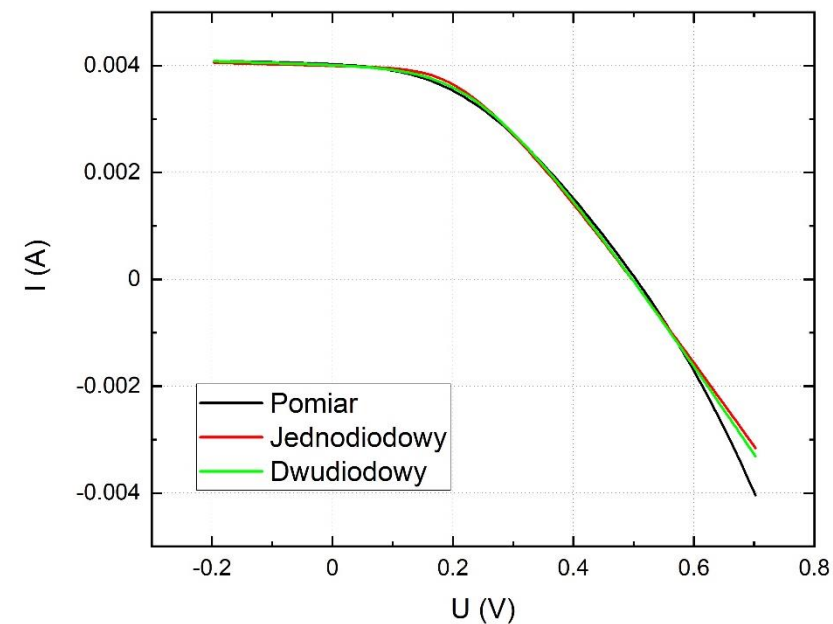
Wpływ R_s oraz R_{sh} na charakterystykę „jasną” ogniwa



Przypadek idealny



R_s i R_{sh} małe



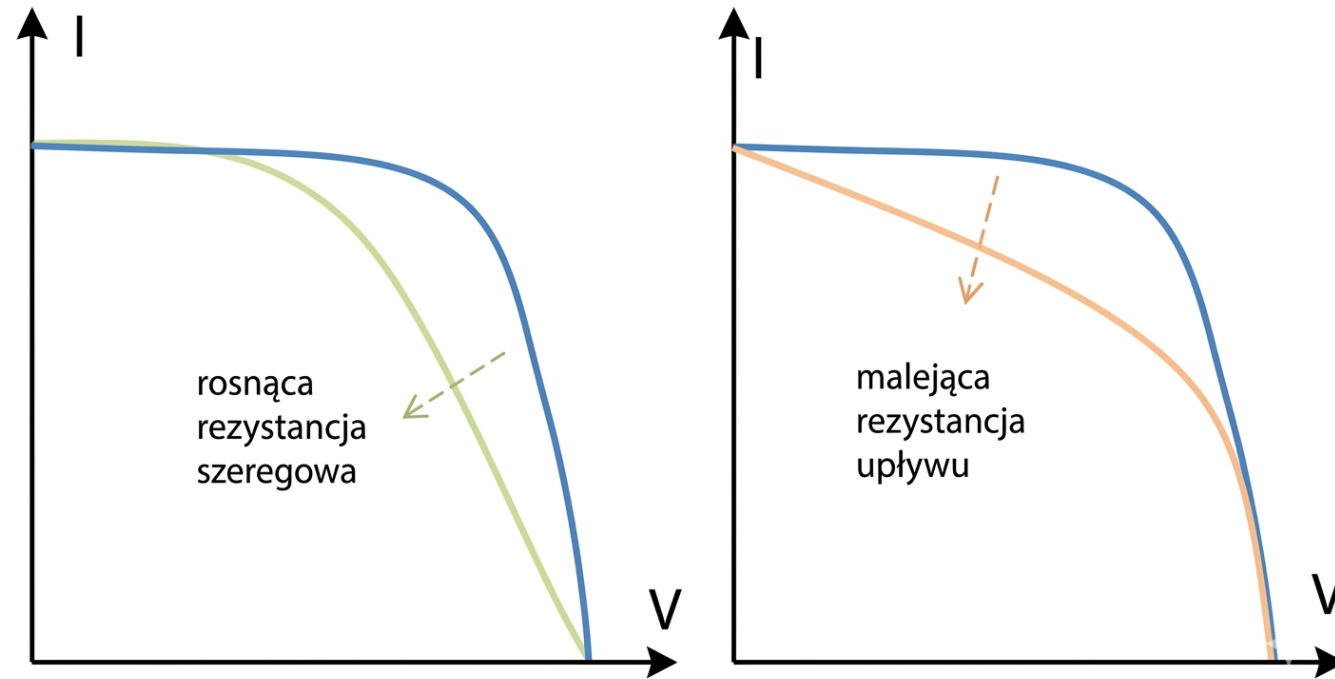
R_s i R_{sh} duże

Parametr	SDM	DDM
I_{sc} (mA)	3181.27	3183.85
R_s (mOhm)	5.41202	7.56196
R_{sh} (kOhm)	71.4466	25.6086
I_{01} (A)	9.31529e-07	2.10883e-10
I_{02} (A)		1.30949e-05

Parametr	SDM	DDM
I_{sc} (mA)	1.22436	1.23803
R_s (Ohm)	9.07792	15.7478
R_{sh} (Ohm)	637.392	631.917
I_{01} (A)	1.18751e-08	2.2005e-12
I_{02} (A)		4.06468e-08

Parametr	SDM	DDM
I_{sc} (mA)	4.06909	4.09351
R_s (kOhm)	58.9336	55.2913
R_{sh} (kOhm)	3.42349	3.09723
I_{01} (A)	6.69527e-10	6.32609e-12
I_{02} (A)		1.47355e-07

Wpływ R_s oraz R_{sh} na charakterystykę „jasną” ogniwa



Rys. Wpływ rezystancji szeregowej i rezystancji upływu na charakterystykę I-V ogniwa.



Jak wynika z powyższych wykresów, R_s powinna być jak najmniejsza a R_{sh} jak największa. **Przypadek idealny: $R_s \sim m\Omega$, $R_{sh} \sim k\Omega$**

Zależność napięcia rozwarcia od natężenia światła

Prąd ciemny płynący przez złącze p-n spolaryzowane napięciem V_{oc} , wyraża się równaniem Shockley'a:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Ten prąd równoważy w rozwartym oświetlonym złączu p-n maksymalny prąd fotogeneracji, czyli I_{sc} :

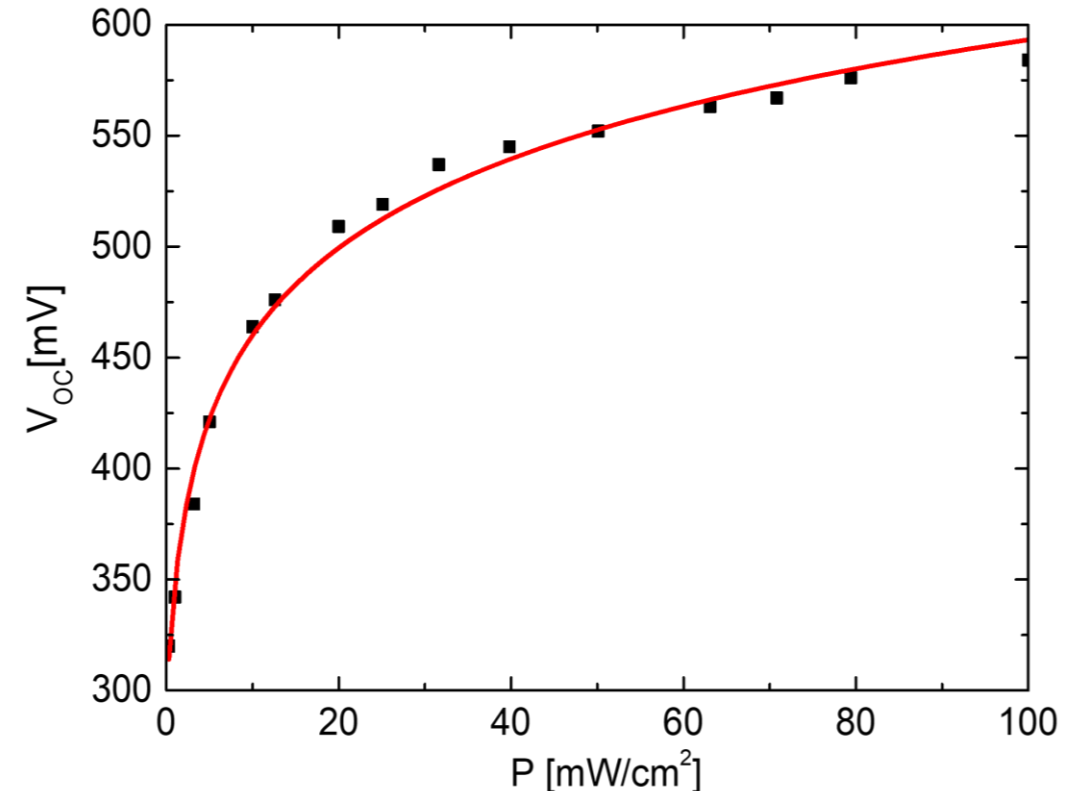
$$I_{sc} = I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Po przekształceniu:

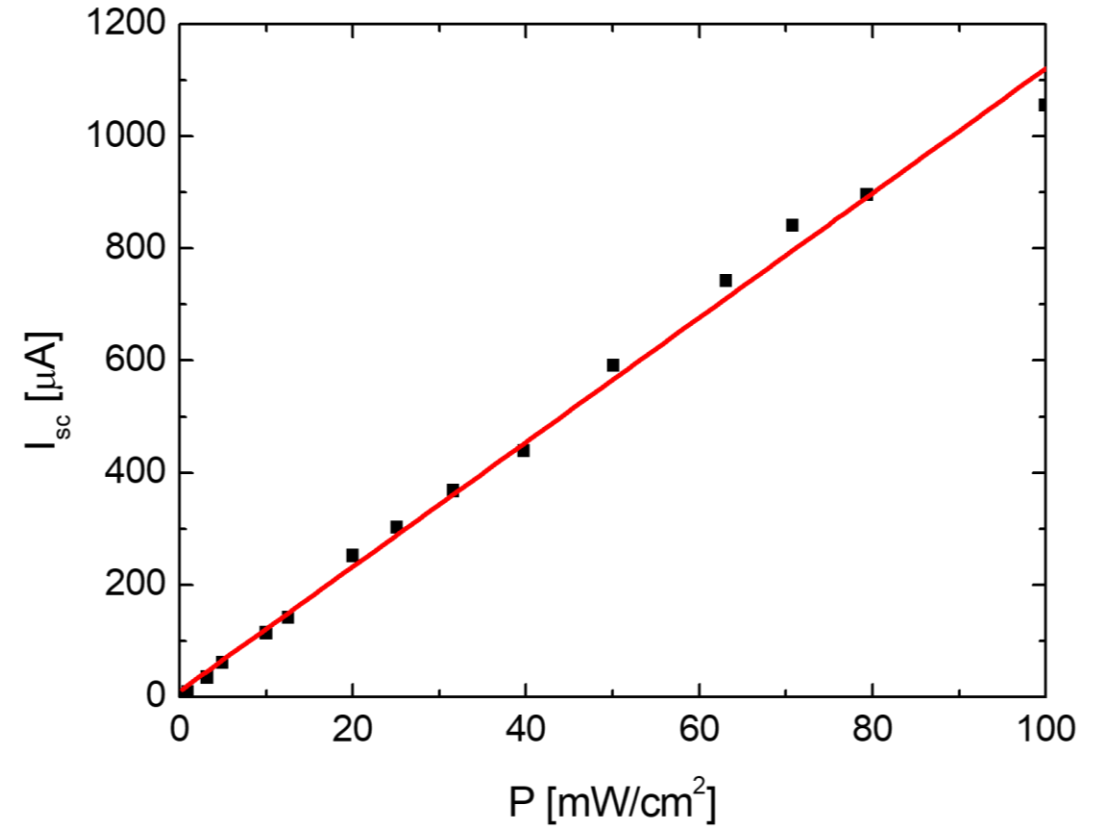
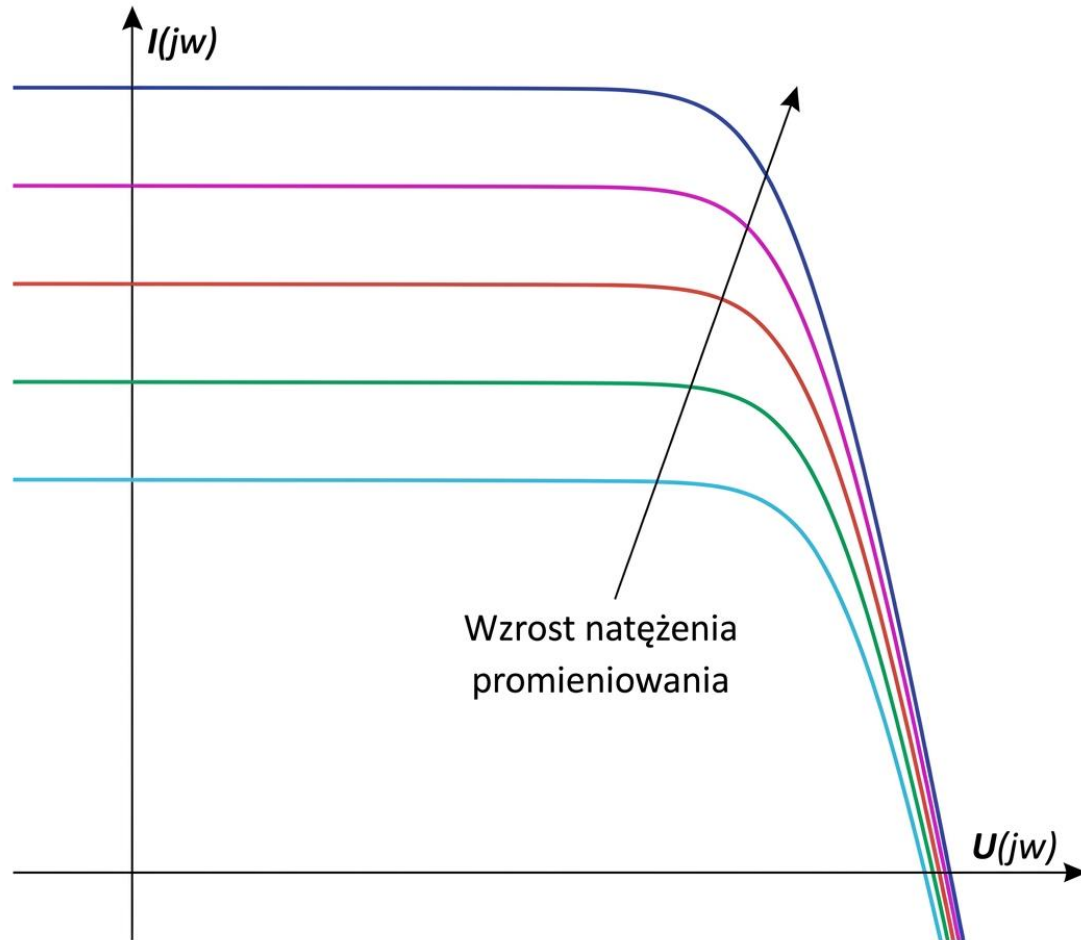
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left[\ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \right] \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right)$$

Ponieważ $I_{sc} \sim P$, to:

$$V_{oc} \sim \ln P$$



Zależność prądu zwarcia od natężenia światła



$$I_{sc} = qN_{ph}(E_g)$$

Zależność prądu zwarcia od temperatury

