

Zastosowanie efektu fotoelektrycznego

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Animacja](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Zastosowanie efektu fotoelektrycznego

Źródło: dostępny w internecie: <https://stock.adobe.com/pl/images/electric-circuit-ionization-with-laser-b/249313903>
[dostęp 27.09.2022].

Czy to nie ciekawe?

Zjawisko fotoelektryczne jest jednym z tych efektów, których poznanie było owocem wyteźonej pracy i wielogodzinnych badań laboratoryjnych wielu naukowców. Zanim Albert Einstein wyjaśnił efekt wprowadzając pojęcie kwantów, czyli porcji energii, wielu badaczy, m.in. Henrich Hertz czy Aleksandr Stoletow, pieczołowicie badało różne aspekty tego zjawiska. Najprawdopodobniej żaden z nich nie przypuszczał, jak doniosłe znaczenie praktyczne będzie miała ich praca. Dziś efekt fotoelektryczny zewnętrzny i wewnętrzny stanowi podstawę działania tak powszechnych urządzeń jak fotokomórki, ogniwa słoneczne czy matryce CCD.

Twoje cele

W tym e-materiale:

- poznasz praktyczne zastosowania efektu fotoelektrycznego zewnętrznego,

- zrozumiesz mechanizm działania automatycznie zapalanych lamp ulicznych,
- poznasz zasadę działania ogniwa fotowoltaicznego i matrycy CCD,
- zastosujesz zdobytą wiedzę do rozwiązania zadań.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Efekt fotoelektryczny zewnętrzny

[Efektem fotoelektrycznym zewnętrznym](#) nazywamy zjawisko emisji elektronów z metalu pod wpływem padającego promieniowania elektromagnetycznego. Mechanizm zachodzenia zjawiska polega na tym, że fotony promieniowania przekazują swoją energię elektronom, co skutkuje ich emisją poza obszar metalu. Maksymalna energia kinetyczna elektronu równa jest energii fotonu pomniejszonej o pracę wyjścia. Praca wyjścia jest energią wiązania elektronu w metalu, zazwyczaj przyjmuje ona wielkości rzędu kilku elektronowoltów.

Energia kinetyczna fotoelektronu jest więc opisywana wzorem:

$$E_e = E - W,$$

gdzie E_e jest energią kinetyczną wybitego elektronu, E jest energią fotonu, a W – pracą wyjścia.

Pamiętając, że energia fotonu jest iloczynem stałej Plancka ($h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$) i częstotliwości promieniowania, otrzymujemy wyrażenie

$$E_e = h \cdot f - W.$$

Aby zaszło zjawisko fotoelektryczne energia fotonu musi przewyższać pracę wyjścia ($h \cdot f > W$). Graniczną częstotliwością jest więc częstotliwość określona jako:

$$f_{gr} = W/h.$$

Fotokomórka

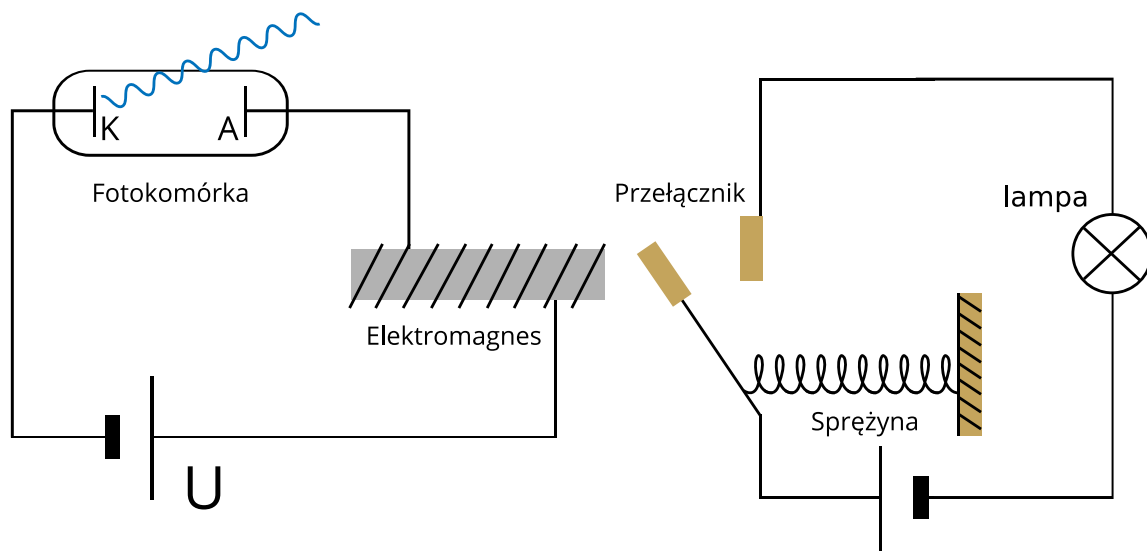


Rys. a. Fotografia fotokomórki z lat 40. ubiegłego wieku.

Źródło: Antonio Pedreira, dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phototube_from_the_1940s.jpg [dostęp 27.09.2022], domena publiczna.

Najpopularniejszym urządzeniem wykorzystującym zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne jest fotokomórka. Pierwsze fotokomórki powstały już w latach 90. XIX wieku, a zaczęły być powszechnie wykorzystywane w pierwszej połowie XX wieku. Najprostsza fotokomórka składa się dwóch elektrod, katody i anody, umieszczonych w bańce próżniowej. Pomiędzy elektrodami przyłożone jest napięcie w taki sposób, że katoda podłączona jest do dodatniego bieguna napięcia zasilającego. Jeśli promieniowanie elektromagnetyczne nie pada na katodę, prąd w obwodzie nie płynie. Po oświetleniu katody promieniowaniem o energii fotonów większej od pracy wyjścia materiału katody, elektrony zostają wybite z katody i migrują w kierunku anody powodując przepływ prądu. Oświetlona fotokomórka przewodzi prąd.

Obwody zawierające fotokomórkę mogą być wykorzystane np. do zapalania lamp ulicznych. Lamy zapalają się o zmroku. Mechanizm, który spowoduje ich zapalenie reaguje na brak oświetlenia, czyli na ustanie przepływu prądu w obwodzie zawierającym fotokomórkę. Przykład takiego obwodu prezentuje Rys. 2.



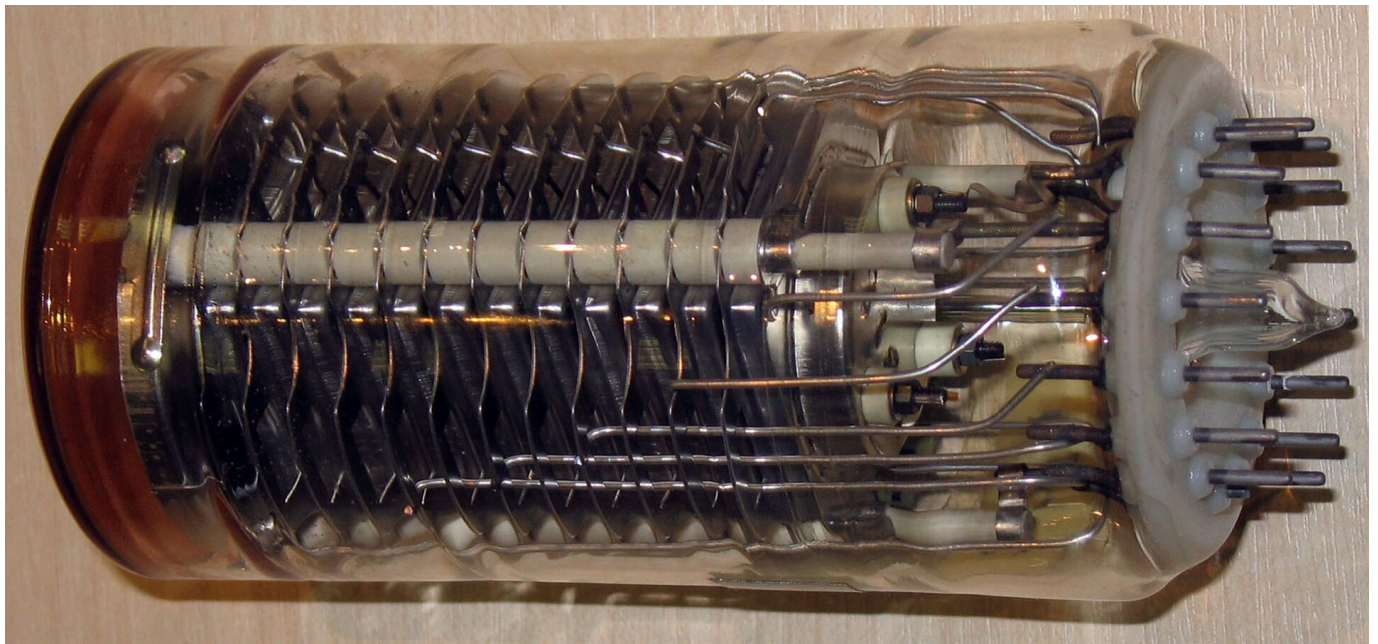
Rys 2. Schemat układu lampy ulicznej, automatycznie zapalającej się po zmroku

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Oświetlona fotokomórka przewodzi prąd. W obwodzie znajduje się elektromagnes. Jeśli przez elektromagnes przepływa prąd, wytworzone pole magnetyczne przyciąga ramię przełącznika powodując, że obwód lampy jest otwarty, a lampa wyłączona. Przerwanie dostępu światła powoduje zatrzymanie przepływu prądu w obwodzie fotokomórki, wyłączenie elektromagnesu, zamknięcie obwodu lampy i finalnie jej zapalenie.

Fotopowielacz

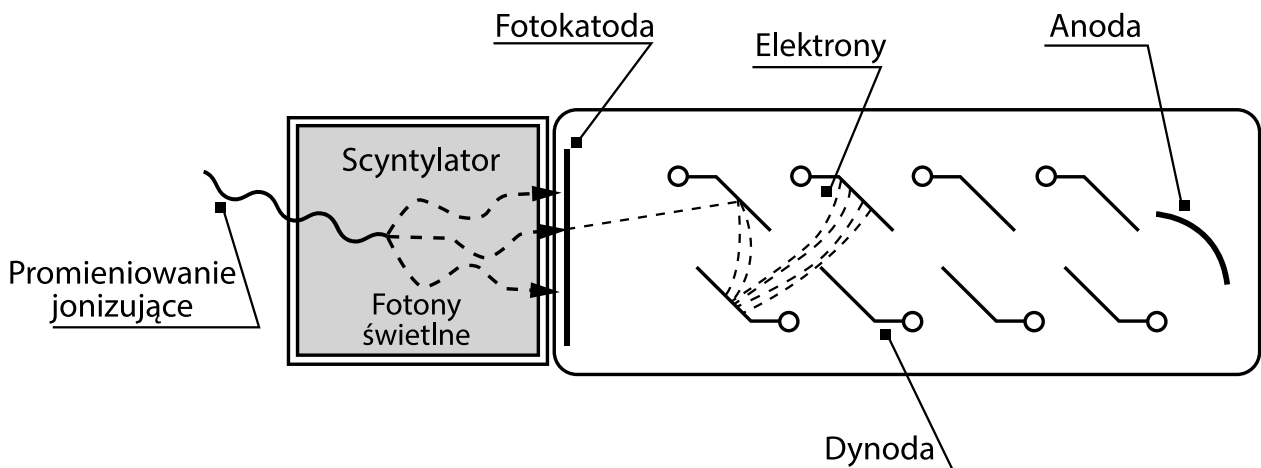


Rys. 2a. Fotopowielacz

Źródło: Poil, dostępny w internecie: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pmside2.jpg> [dostęp 27.09.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

Fotopowielacze są urządzeniami służącymi do pomiaru światła. Najczęściej są one połączone ze scyntylatorem, czyli materiałem, który pochłania promieniowanie jonizujące (np. promieniowanie gamma lub beta) i emituje światło widzialne lub ultrafioletowe. Wypromieniowane światło jest pochłaniane przez fotopowielacz i zmieniane na sygnał elektryczny. Scyntylator zestawiony z fotopowielaczem stanowią detektor promieniowania jonizującego, czyli urządzenie, które pochłania promieniowanie jonizujące oraz generuje sygnał elektryczny zależny od pochłoniętego promieniowania.

Budowa fotopowielacza jest bardzo zbliżona do budowy fotokomórki próżniowej. Najważniejsze jej elementy to fotokatoda, na której zachodzi [efekt fotoelektryczny zewnętrzny](#) oraz anoda, na której zbiera się ładunek. Dodatkowo w obszarze pomiędzy katodą i anodą znajduje się szereg elektrod, których zadaniem jest wzmocnienie ładunku, czyli zwiększenie liczby elektronów padających na anodę. Elektrody te są nazywane dynodami. Wszystkie trzy typy elektrod umieszczone są w silnym polu elektrycznym. Mechanizm działania fotopowielacza został poglądowo zaprezentowany na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat budowy fotopowielacza. Fotony świetlne wyemitowane ze scyntylatora docierają do fotokatody powodując emisję elektronu w wyniku zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego. Elektron jest przyspieszany w polu elektrycznym, co prowadzi do zwiększenia jego energii kinetycznej. Zderzając się z dynodą elektron powoduje emisję kilku elektronów wtórnych, które także są przyspieszane i także powielane po zderzeniu z kolejną dynodą. Liczba elektronów ulega lawinowemu zwiększeniu, dzięki czemu ostateczny sygnał elektryczny docierający do anody jest możliwy do pomiaru

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Fotopowielacze charakteryzuje wysoka czułość. Oznacza to, że mogą być wykorzystywane do pomiaru światła o bardzo małym natężeniu. Pod tym względem zdecydowanie przeważają nad matrycami CCD, o których przeczytasz w kolejnych akapitach.

Efekt fotoelektryczny wewnętrzny

[Efekt fotoelektryczny wewnętrzny](#) również opiera się na przekazie energii fotonów elektronom. Te jednak nie opuszczają materiału, w którym się znajdują, ale zmieniają powłokę elektronową w atomie. Może to prowadzić do zmiany zdolności przewodzenia materiału, a w konsekwencji przepływu prądu.

Efekt fotoelektryczny wewnętrzny występuje w [półprzewodnikach](#), czyli materiałach, których zdolność przewodzenia prądu elektrycznego jest mniejsza niż przewodników i większa niż izolatorów. Aby lepiej zrozumieć jego mechanizm przypomnijmy sobie pasmową teorię przewodnictwa. Elektronowe poziomy energetyczne

w półprzewodnikach należą do dwóch grup – pasma walencyjnego i pasma przewodnictwa. Pasma te są energetycznie rozdzielone obszarem wzbronionym. Elektrony o energii z zakresu pasma walencyjnego są związane w atomach i nie uczestniczą w przepływie prądu. Elektrony o energii należącej do pasma przewodzenia są swobodne i mogą poruszać się pod wpływem przyłożonego napięcia, czyli przewodzić prąd. Zmiana energii elektronu od wartości należącej do pasma walencyjnego do wartości odpowiadającej pasmu przewodzenia, poprzez pochłonięcie energii fotonu promieniowania elektromagnetycznego, nazywamy [zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym](#). W efekcie pasmo przewodnictwa zostaje wzbogacone o swobodny nośnik ładunku ujemnego – elektron, a pasmo walencyjne o dziurę elektronową, czyli nieobsadzone miejsce po elektronie, które również uczestniczy w przepływie prądu. Powoduje to wzrost zdolności przewodzenia prądu danego materiału. Aby zaszło zjawisko energia fotonu musi być większa od szerokości obszaru wzbronionego. Podobnie jak w [zjawisko fotoelektrycznym zewnętrznym](#) występuje częstotliwość graniczna promieniowania, poniżej której efekt nie zachodzi.

Półprzewodnik składający się z jednego, czystego materiału nazywamy półprzewodnikiem samoistnym. W takich materiałach liczba ujemnych nośników ładunku w paśmie przewodnictwa – elektronów równy jest liczbie ładunków dodatnich w paśmie walencyjnym – dziur. W praktyce często stosowane są jednak półprzewodniki domieszkowane, czyli wzbogacone niewielką ilością innego materiału. W zależności od rodzaju domieszki wyróżniamy dwa typy półprzewodników: typu n , i p . [Półprzewodnik typu \$n\$](#) to taki, w którym wskutek obecności domieszki przeważają nośniki ujemne. W [półprzewodniku typu \$p\$](#) przeważają dziury. Warto pamiętać, że mówimy tylko o nośnikach ładunków uczestniczących w przewodzeniu prądu, cały kryształ jest elektrycznie obojętny.

Złącze $p-n$

Składając ze sobą półprzewodnik typu p z półprzewodnikiem typu n otrzymujemy [złącze \$p-n\$](#) . Z powodu różnic w koncentracji dziur i elektronów po złączeniu materiałów nadmiarowe elektrony dyfundują z półprzewodnika n do półprzewodnika typu p oraz dziury w odwrotnym kierunku. Elektrony, które przedyfundowały z półprzewodnika typu n do p obsadzają obecne tam dziury, powodując zanik swobodnych nośników prądu. Analogiczny proces następuje w półprzewodniku typu p . Wskutek tego procesu półprzewodnik typu n zostaje lokalnie, na styku materiałów,

naelektryzowany dodatnio, a półprzewodnik typu p naelektryzowany ujemnie. Warstwa ta praktycznie nie posiada swobodnych nośników ładunku. Powoduje to zahamowanie dalszej dyfuzji nośników. Nieruchomy ładunek dodatni po stronie n hamuje przepływ dziur z obszaru p , natomiast ładunek ujemny po stronie p hamuje przepływ elektronów z obszaru n . Od tego momentu dwa połączone półprzewodniki nazywamy złączem $p-n$.

Ogniwo fotowoltaiczne (ogniwo słoneczne)

Ogniwem fotowoltaicznym jest urządzeniem, w którym następuje przemiana **energii fotonu** światła w **energię elektryczną**.

Ogniwa słoneczne wykorzystują opisane powyżej złącza $p-n$. Fotony padające na granicę półprzewodników powodują wybijanie elektronów z warstwy walencyjnej do warstwy przewodzenia, czyli powstanie pary elektron-dziura. Wskutek istnienia przestrzennego rozkładu ładunków na granicy $p-n$ elektrony dyfundują w stronę półprzewodnika typu n , a dziury w stronę półprzewodnika typu p i tam zostają. Wraz z gromadzeniem się ładunków powstaje różnica potencjałów na granicy ośrodków, czyli napięcie elektryczne. W tym procesie energia światła słonecznego jest bezpośrednio zmieniana na energię elektryczną. Jest to więc świetne źródło energii elektrycznej. Warto mieć jednak w pamięci, że wymaga ono zastosowania baterii, służących do przechowywania energii elektrycznej.

Matryca CCD

Matryca CCD jest elementem światłoczułym, który wyparł tradycyjne klisze fotograficzne otwierając furtkę do powstania i rozpowszechnienia fotografii cyfrowej. Matryca jest zbudowana z szeregu półprzewodnikowych pikseli o rozmiarze około kilkunastu milimetrów kwadratowych. Światło padające na półprzewodnikowy piksel powoduje wybicie elektronu z pasma walencyjnego. Do każdego piksela przyłożona jest elektroda umożliwiająca gromadzenie i zbieranie ładunku. Wielkość ładunku zależy od natężenia światła oświetlającego piksel. Sama matryca CCD nie rozróżnia barw. Ta funkcja jest realizowana przez zastosowanie filtrów barwnych o trzech kolorach podstawowych – czerwonym, zielonym i niebieskim. Ważnym parametrem dla matryc CCD jest ich wydajność kwantowa, która określa, jaki procent padającego

światła jest rejestrowana. Współczesne matryce mają wydajność kwantową na poziomie 70%, czyli ponad 10 razy więcej niż tradycyjne klisze fotograficzne.

Słowniczek

efekt fotoelektryczny zewnętrzny

(*ang.: photoelectric effect*) - zjawisko wybijania elektronów z powierzchni materiału pod wpływem padającego promieniowania elektromagnetycznego. Zjawisko polega na przekazywaniu całej energii fotonu promieniowania elektronowi, zwanego fotoelektronem. Energia kinetyczna fotoelektronów nie zależy więc od natężenia promieniowania, a od jego częstotliwości.

efekt fotoelektryczny wewnętrzny

(*ang.: internal photoelectric effect*) - zjawisko zachodzące w półprzewodnikach, w którym pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego elektrony znajdujące się w paśmie walencyjnym są przenoszone do pasma przewodnictwa. Efekt prowadzi do uwolnienia dwóch nośników ładunków - ujemnego elektronu i dodatniej dziury. Minimalna energia fotonów niezbędna do zajścia tego zjawiska równa jest przerwie energetycznej pomiędzy pasmem walencyjnym i przewodnictwa.

półprzewodnik

(*ang.: semiconductor*) - materiał, którego zdolność przewodzenia prądu elektrycznego jest mniejsza niż przewodników i większa niż izolatorów. Nośnikiem ładunku w półprzewodnikach są elektrony znajdujące się w paśmie przewodzenia oraz dodatnie dziury, powstające w skutek przeniesienia elektronu z pasma walencyjnego do przewodnictwa.

półprzewodnik typu n (nadmiarowy)

(*ang.: n -type semiconductor*) - półprzewodnik, który wskutek obecności domieszki posiada znacznie więcej elektronów w paśmie przewodnictwa niż dziur w paśmie walencyjnym. Elektrony nazywane są nośnikami większościowymi.

półprzewodnik typu p (niedomiarowy)

(*ang.: p-type semiconductor*) - półprzewodnik, w którym wskutek obecności domieszki, przeważają nośniki typu dziurowego, które stanowią tym samym nośniki większościowe.

złącze $p-n$

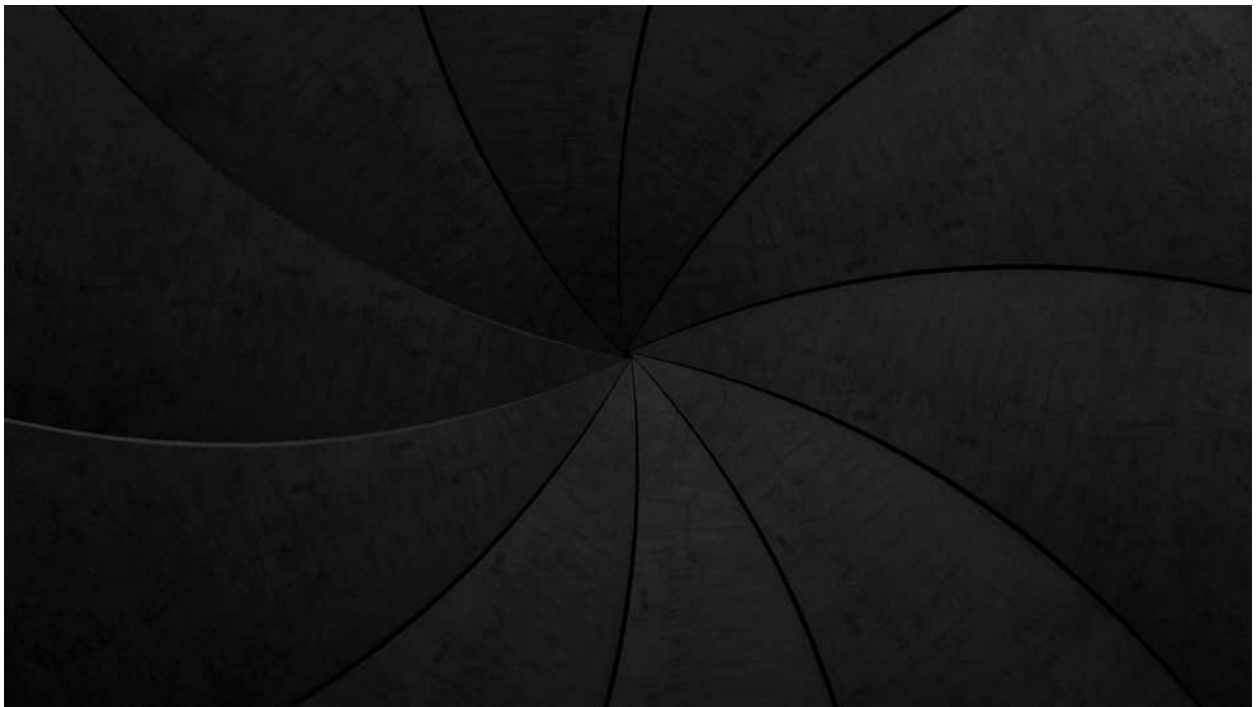
(*ang.: p-n junction*) - warstwa przejściowa między obszarem półprzewodnika typu p i półprzewodnika typu n . Złącze nie posiada swobodnych nośników prądu i stanowi dla nich warstwę zaporową.

Animacja

Zastosowanie efektu fotoelektrycznego

Polecenie 1

Obejrzyj animację, w której omówiono efekt fotoelektryczny zewnętrzny i jego zastosowanie do automatycznego zapalania i wyłączenia lamp ulicznych. Zwróć uwagę na schemat obwodów elektrycznych.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1YzxBXoitigm>



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Zapoznaj się z audiodeskrypcją animacji.

Polecenie 2

Odpowiedz na pytanie: Co jest źródłem światła uruchamiającym fotokomórkę w układach prawdziwych lamp ulicznych?

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Zaznacz poprawne zdanie. Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne:

- polega na zmianie izolatora w półprzewodnik
- może wystąpić, o ile energia wywołującego je fotonu jest większa od pracy wyjścia
- polega na przeniesieniu elektronu z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego w półprzewodnikach
- polega na emisji kilku elektronów z powierzchni metalu pod wpływem padającego elektronu

Ćwiczenie 2



Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi. Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne:

- może zwiększać zdolność przewodzenia półprzewodnika
- zmienia półprzewodnik typu p na typ n
- polega na emisji elektronu z powierzchni metalu pod wpływem padającego promieniowania elektromagnetycznego
- powoduje wygenerowanie pary elektron-dziura, czyli ujemnego i dodatniego nośnika ładunków w półprzewodnikach

Ćwiczenie 3



Projektując fotokomórkę sterującą zapalaniem lamp ulicznych, jaki materiał wykorzystasz do zrobienia fotokatody? Zaznacz wszystkie właściwe odpowiedzi.

- a) kadm o pracy wyjścia wynoszącej 4,08 eV
- b) krzem o szerokości przerwy energetycznej wynoszącej 1,11 eV
- c) cez o pracy wyjścia wynoszącej 2,14 eV
- d) fosforek glinu o szerokości przerwy energetycznej wynoszącej 2,45 eV

Ćwiczenie 4



Z ilu dynod musi składać się fotopowielacz, aby z jednego fotonu otrzymać sygnał o ładunku 1,6 nC? Współczynnik powielenia dynody, czyli liczba elektronów wtórnych wybitych przez padający elektron pierwotny, wynosi 10, a ładunek elementarny $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Odpowiedź: Z dynod.

Ćwiczenie 5



Wiedząc, że szerokość przerwy energetycznej w krzemie wynosi 1,11 eV, a stała Plancka $h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ eV·s, uzupełnij zdania:

1. Krzem to materiał odpowiedni / nieodpowiedni do budowy matryc CCD dla aparatów fotograficznych.
2. Taka matryca jest / nie jest odporna na działanie wysokich temperatur

Ćwiczenie 6



Masz do dyspozycji trzy materiały o podanej szerokości przerwy energetycznej: german - 0,7 eV, azotek galu - 3,4 eV, fosforek galu - 2,26 eV. Wybierz materiał, który wykorzystasz do zbudowania matrycy CCD w kamerze termowizyjnej. Odpowiedź uzasadnij.

Ćwiczenie 7



Analizując zasadę działania ogniwa słonecznego odpowiedz na pytania:

1. Jaki rodzaj prądu jest generowany w ogniwie, stały czy zmienny?

Odp.: Stały / Zmienny

2. Czy ilość uzyskanej energii elektrycznej jest proporcjonalna do energii padających fotonów?

Odp.: Tak / Nie

Ćwiczenie 8



Jakie znasz zalety i wady bądź ograniczenia wykorzystania elektrowni fotowoltaicznych?

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Aleksandra Fijałkowska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Zastosowanie efektu fotoelektrycznego
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

**Podstawa
programowa**

Cele kształcenia – wymagania ogólne

IV. Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych, w tym tekstów popularnonaukowych.

Zakres podstawowy

Treści nauczania – wymagania szczegółowe

I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:

7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach.

X. Fizyka atomowa. Uczeń:

5) opisuje zjawiska jonizacji, fotoelektryczne i fotochemiczne jako wywołane tylko przez promieniowanie o częstotliwości większej od granicznej.

Zakres rozszerzony

Treści nauczania – wymagania szczegółowe

I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:

7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach.

XI. Fizyka atomowa. Uczeń:

7) opisuje zjawiska jonizacji, fotoelektryczne i fotochemiczne jako wywołane tylko przez promieniowanie o częstotliwości większej od granicznej.

Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: <ul style="list-style-type: none"> • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. wymienia praktyczne zastosowania efektu fotoelektrycznego zewnętrznego; 2. objaśnia zasadę działania ogniwa fotowoltaicznego i matrycy CCD; 3. analizuje zalety i ograniczenia stosowania ogniw fotowoltaicznych.
Strategie nauczania	odwrócona klasa
Metody nauczania	prezentacja multimedialna
Formy zajęć:	praca indywidualna
Środki dydaktyczne:	komputer i rzutnik
Materiały pomocnicze:	-
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	

Tematem lekcji jest zastosowanie efektu fotoelektrycznego zewnętrznego i wewnętrznego. Przed zajęciami uczniowie otrzymują polecenie przygotowania prezentacji dotyczącej zasady działania jednego z wymienionych urządzeń wykorzystujących zjawisko fotoelektryczne: fotokomórka, fotopowielacz, matryca CCD i ogniwo fotowoltaiczne.

Nauczyciel wprowadza pojęcia zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego i wewnętrznego oraz przypomina podstawowe informacje o półprzewodnikach zgodnie z załączonym tekstem.

Faza realizacyjna:

Uczniowie prezentują zebraną wiedzę o wybranych urządzeniach wykorzystujących efekt fotoelektryczny w formie prezentacji multimedialnej. Nauczyciel ocenia przygotowanie uczniów dając im informację zwrotną odnośnie ich wiedzy i stopnia przygotowania oraz wyjaśnia ewentualne wątpliwości.

Faza podsumowująca:

Uczniowie dyskutują o wadach i zaletach stosowania ogniw fotowoltaicznych.

Praca domowa:

Nauczyciel poleca uczniom rozwiązanie zadania 5, 6 i 7.

**Wskazówki
metodyczne
opisujące różne
zastosowania
danego
multimedium**

Uczniowie mogą wykorzystać multimedium przygotowując się do lekcji.