



Półprzewodniki typu n

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



Źródło: dostępny w internecie: https://pngtree.com/freebackground/blue-big-data-the-internet-banner_929540.html?share=3 [dostęp 11.07.2022], tylko do użytku niekomercyjnego.

Czy to nie ciekawe?

Jeżeli do czystego metalu, który dobrze przewodzi prąd elektryczny wprowadza się dodatkowo atomy innego metalu w niewielkich ilościach, to praktycznie zawsze powstałe stopy metali mają większy opór elektryczny od czystych, jednoskładnikowych metali. Takie same skutki powodują wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia w metalach. Odwrotnie dzieje się w półprzewodnikach. Wprowadzenie, szczególnie w sposób kontrolowany, domieszki może zmniejszyć opór elektryczny o kilka rzędów wielkości. Jedną z metod domieszkowania jest wprowadzenie domieszki zwiększającej liczbę elektronów swobodnych. W ten sposób powstają półprzewodniki typu n .

Twoje cele

- dowiesz się, co to jest półprzewodnik typu n ,
- poznasz wpływ domieszki na ilość nośników prądu,
- zrozumiesz, dlaczego domieszki powodują wzrost liczby nośników prądu w półprzewodnikach, a tym samym zmniejszenie oporu elektrycznego,
- zastosujesz zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań,
- przeanalizujesz i zinterpretujesz interaktywną animację ilustrującą wpływ domieszki na ilość nośników prądu w półprzewodnikach.

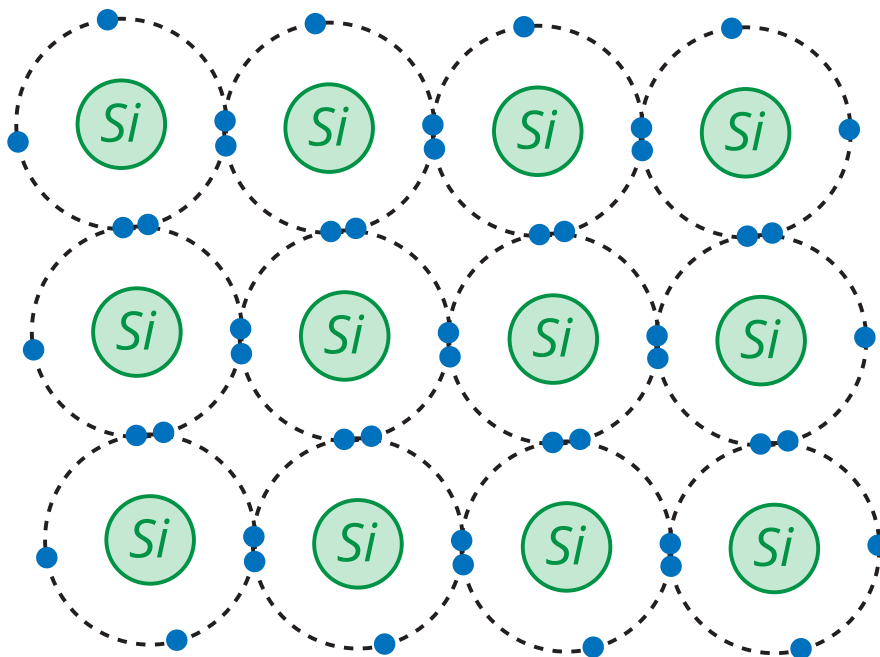
Przeczytaj

Warto przeczytać

Przewodność półprzewodników można regulować przez wprowadzenie w sposób kontrolowany domieszek. Stosowane są dwa rodzaje domieszek:

- domieszki typu *n* (od słowa negatywne – ujemne), które zwiększają ilość elektronów swobodnych – ujemnych nośników prądu;
- domieszki typu *p* (pozytywne – dodatnie), które zwiększają ilość **dziur** – dodatnich nośników prądu.

Najczęściej stosowane jako półprzewodniki pierwiastki, krzem i german, leżą w czternastej grupie układu okresowego. Ich atomy mają więc cztery elektrony walencyjne i w cieple stałym tworzą **wiązania kowalencyjne** z czterema sąsiednimi atomami – Rys. 1.

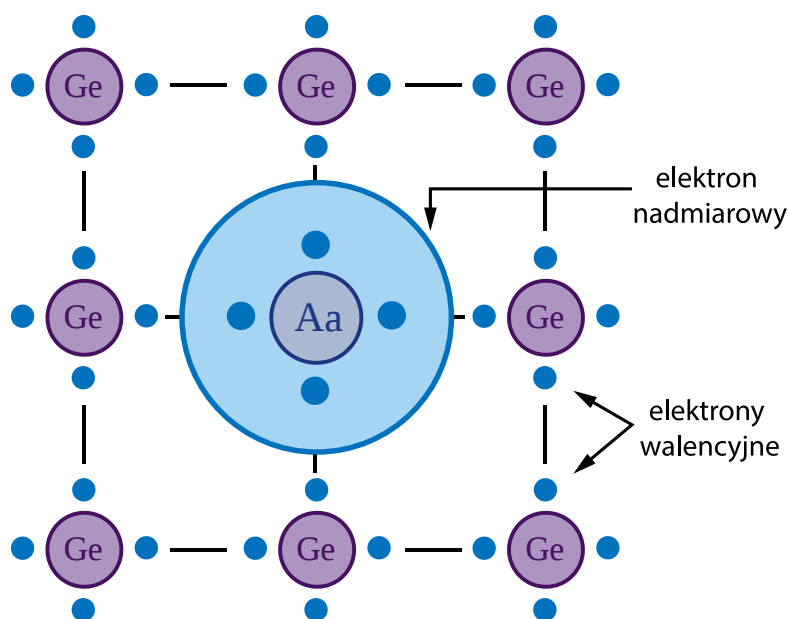


Rys. 1. Struktura krzemu w dwóch wymiarach (niebieskie kropki to elektrony)

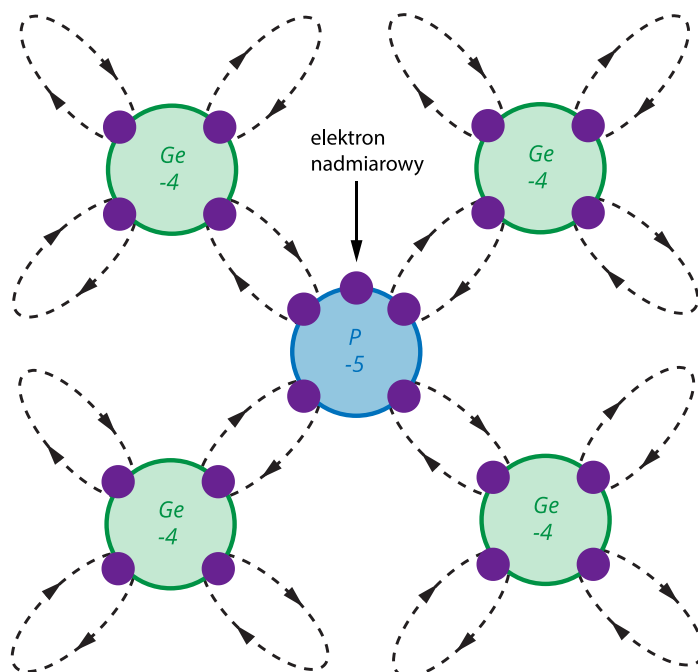
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

W wyniku uzyskania energii od drgających atomów sieci krystalicznej elektrony mogą urwać się z wiązań międzyatomowych stając się elektronami swobodnymi i mogą przewodzić prąd elektryczny. Ponadto po urwanym elektronie pozostaje „dziura”, w którą mogą przechodzić elektrony z sąsiednich wiązań. Z kolei elektron, który przechodzi do wolnej **dziury**, pozostawia po sobie kolejną **dziurę**. Powstaje efekt taki, jakby **dziura** przemieszczała się przeciwnie do ruchu przeskakującego elektronu. Ruch ten opisuje się jako ruch dodatniego nośnika prądu – **dziury**. Więcej na temat przewodzenia prądu przez półprzewodniki możesz przeczytać w e-materiale „W jaki sposób półprzewodniki przewodzą prąd elektryczny”.

Półprzewodniki typu n uzyskuje się z krzemu i germanu dodając atomy pięciowartościowe – z piętnastej grupy układu okresowego. Najczęściej są to fosfor i arsen, mogą też być to antymon lub bizmut. Atomy te wykorzystują do tworzenia wiązań cztery elektrony, uwspólniając je z czterema sąsiednimi atomami krzemu, a piąty, nieprzydatny w wiązaniach, jest słabo związany i dosyć łatwo uzyskuje energię od drgających cieplnie atomów sieci krystalicznej wystarczającą do tego, aby stał się elektronem swobodnym. W temperaturze pokojowej praktycznie wszystkie „piąte” elektrony domieszek są elektronami swobodnymi stając się tak zwanymi nośnikami większościowymi.



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



Rys. 2. Domieszki typu n na przykładzie germanu

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

Typowa liczba atomów domieszek, jaką się dodaje, wynosi około 10^{15} - 10^{18} atomów na centymetr sześcienny materiału macierzystego.

Zawartość domieszek możemy opisać liczbą wprowadzonych atomów domieszek na jednostkę objętości domieszkowanego materiału, lub liczbą atomów domieszek na milion atomów macierzystych.

Związek między tymi wielkościami wyznaczmy na przykładzie germanu.

Problem sformułujmy następująco:

Wprowadźmy do jednego centymetra sześciennego germanu około 10^{16} atomów fosforu. Obliczmy, ile to da atomów fosforu na milion atomów germanu.

Potrzebne dane to:

$M = 72,6 \text{ g/mol}$ – masa molowa germanu,

$d = 5,32 \text{ g/cm}^3$ – gęstość germanu,

$N_A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ – liczba Avogadra.

Obliczamy liczbę moli germanu n w centymetrze sześciennym materiału. W tym celu musimy podzielić masę jednostki objętości – czyli gęstość d przez masę jednego mola germanu. Otrzymujemy:

$$n = \frac{d}{M} = \frac{5,32}{72,6} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} = 0,07 \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3}$$

Liczbę atomów germanu w jednostce objętości N obliczymy, mnożąc liczbę moli w jednostce objętości n przez liczbę atomów w jednym molu – czyli liczbę Avogadra.

Liczba atomów germanu w jednostce objętości N wynosi:

$$N = N_A \cdot n \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 0,07 \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \approx 4,2 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

W jednym centymetrze sześciennym germanu jest zatem około $4,2 \cdot 10^{22}$ atomów.

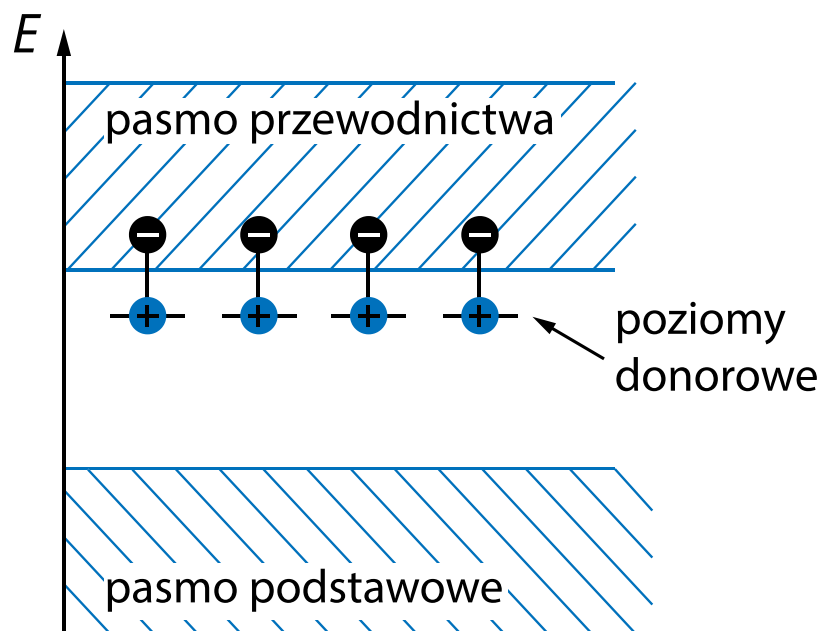
Jeżeli dodamy do jednego centymetra sześciennego germanu, który zawiera około $4,2 \cdot 10^{22}$ atomów, 10^{16} atomów domieszek, to każdy atom domieszki przypadnie na około 4 miliony atomów germanu.

Tak domieszkowany german, w liczbie jednego atomu domieszki na każde kilka milionów atomów macierzystych ma **opór elektryczny właściwy** około 1000 razy mniejszy niż german

samoistny. **Opór elektryczny** nie maleje proporcjonalnie do ilości nośników prądu, ponieważ wprowadzone domieszki utrudniają ruch nośników prądu – maleje **ruchliwość nośników** w porównaniu z półprzewodnikiem samoistnym.

W związkach półprzewodnikowych atomów trzynastej i piętnastej grupy układu okresowego przewodnictwo typu n uzyskuje się na różne sposoby. Może to być domieszkowanie pierwiastkami sześciowartościowymi. Na przykład arsenek galu i fosforek galu może być domieszkowany tellurem lub siarką. Zastąpienie pięciowartościowego atomu arsenu przez sześciowartościowy atom telluru lub siarki, wprowadza nadmiarowy elektron, podobnie jak pięciowartościowy fosfor wprowadzony do czterowartościowego krzemu czy germanu.

Teoria pasmowa przewodnictwa, o której możesz przeczytać w e-materiale „Jak zbudowane są metale”, efekty związane z domieszkowaniem typu n tłumaczy wprowadzeniem przez atomy domieszek poziomów energetycznych o energii niewiele mniejszych – rzędu 10^{-2} eV – niż energie elektronów z zakresu **pasma przewodnictwa**. Elektrony z atomów domieszek znajdujące się na tych poziomach, nazywanych donorowymi, łatwo uzyskują tę niewielką energię od drgających atomów sieci krystalicznej i przechodzą w zakres energii **pasma przewodnictwa** (Rys. 3.). Na przykład fosfor wprowadza do germanu poziom donorowy o energii o 0,013 eV, a w krzemie o 0,045 eV niższej, niż energia z zakresu **pasma przewodnictwa**. Energia, jaką muszą uzyskać elektrony walencyjne, aby przejść w zakres energii pasm przewodnictwa potrzebują energii około stukrotnie większej. W germanie około 0,67 eV, w krzemie 1,12 eV.



Rys. 3. Domieszkowanie typu n w modelu pasmowym

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

Słowniczek

Pasma przewodnictwa

(ang. *conduction band*) pasmo energetyczne określające zakres energii elektronów, przy której mogą przemieszczać się w całej objętości ciała.

Pasmo walencyjne

(ang. *valence band*) (pasmo podstawowe) – zakres energii, jaką mają elektrony walencyjne związane z jądrem atomu.

Wiązanie kowalencyjne

(ang. *covalent bond*) powstaje w wyniku uwspólnienia jednej lub kilku par elektronowych wiążących się atomów, w wyniku czego każdy z nich zachowuje się tak, jakby miał trwałą konfigurację gazu szlachetnego.

Dziura elektronowa

(ang. *electron hole*) brak elektronu w wiązaniu kowalencyjnym wynikający z uwolnienia się elektronu, w teorii pasmowej nieobsadzony elektronowy poziom energetyczny w pasmie walencyjnym. Z teorii pasmowej wynika, że elektrony walencyjne, które zyskały energię odpowiadającą pasmu przewodnictwa – „przechodzą” do pasma przewodnictwa, pozostawiając w pasmie walencyjnym wolny stan energetyczny. Umożliwia to zajęcie tego stanu przez inne elektrony o energii z zakresu poziomu walencyjnego. Zjawisko to może być opisane jako ruch dodatnich nośników prądu – czyli dziur.

Opór elektryczny właściwy

(ang. *electrical resistivity*) miara zdolności materiału do stawiania oporu przepływającemu prądowi elektrycznemu. Możemy opisać ją wzorem $\rho = \frac{RS}{l}$, gdzie ρ – opór elektryczny właściwy, R – opór elektryczny przewodnika, S – pole przekroju poprzecznego przewodnika, l – długość przewodnika.

Ruchliwość nośników

(ang. *electron mobility*) wielkość opisująca wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na średnią prędkość dryfu nośników. Wyrażamy ją wzorem $\mu = \frac{u}{E}$, gdzie μ – ruchliwość, u – średnia prędkość dryfu nośników, E – natężenie zewnętrznego pola elektrycznego.

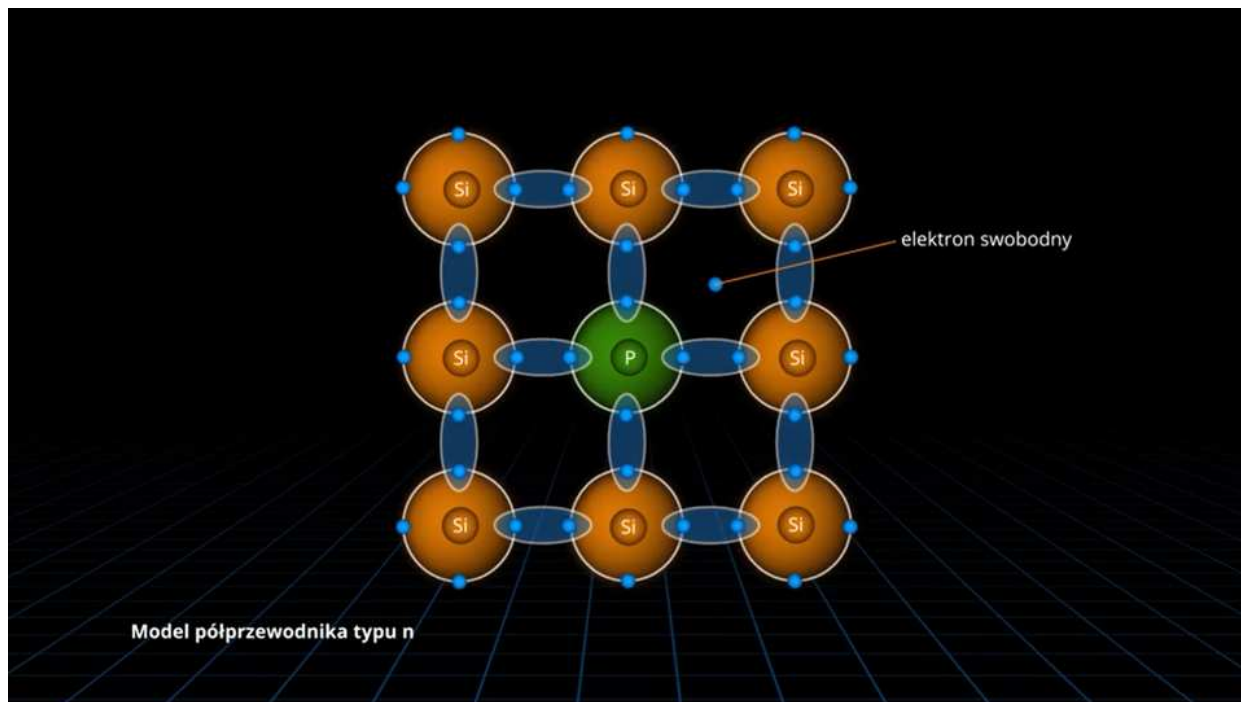
Masa molowa

(ang. *molar mass*) masa jednego mola substancji.

Animacja

Półprzewodniki typu n

Animacja przedstawia, w jaki sposób domieszki zwiększają liczbę swobodnych elektronów w półprzewodnikach na przykładzie krzemu domieszkowanego fosforem.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/RUpkKSQA0M2cw>

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

Zapoznaj się z audiodeskrypcją animacji.

Polecenie 1

Uzupełnij tekst.

W czystym krzemie atomy tworzą wiązania uwspólniając po jednym elektronie z każdym z sąsiednich atomów. Jeżeli do krzemu doda się niewielką liczbę atomów pięciowartościowego fosforu to elektron walencyjny fosforu nie jest wykorzystany do tworzenia wiązań i bardzo łatwo się odrywa. W temperaturze pokojowej praktycznie wszystkie nadmiarowe elektrony fosforu są elektronami , dzięki czemu opór elektryczny domieszkowanego krzemu jest około razy mniejszy niż czystego.

ósmu

tysiąc

ośmiu

przewodnictwa

milion

walencyjnymi

dziesięć

piąty

pięciu

czwarty

czterech

trzeci

Polecenie 2

Które z domieszek krzemu sprawią, że w materiale pojawią się nadmiarowe elektrony?




gal

glin

forsor

arsen

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Pogrupuj pierwiastki pod kątem ich potencjalnego zastosowania jako domieszki w półprzewodniku typu n.

krzem

siarka

chlor

arsen

bor

węgiel

tellur

fosfor

arsenek galu

nienadające się jako domieszki

Ćwiczenie 2



W półprzewodniku typu n nośnikami prądu elektrycznego są:

- Elektrony i dziury w takim samym stopniu
- Wyłącznie elektrony
- Elektrony i dziury, ale dominuje przewodnictwo elektronów.
- Wyłącznie dziury

Ćwiczenie 3



Wyjaśnij, dlaczego domieszkowanie półprzewodników powoduje zmniejszenie ich oporu elektrycznego?

Ćwiczenie 4



Przerwa wzbroniona – czyli najmniejsza energia, jaką muszą uzyskać elektrony walencyjne, aby uzyskać energię z zakresu pasma przewodnictwa – w krzemie samoistnym wynosi około 1,12 eV. Domieszkowanie krzemu fosforem wprowadza poziomy donorowe, dla których odległość energetyczna od pasma przewodnictwa wynosi około 45 meV (milielektronowolty). Wynika z tego, że energia, jaką potrzebują elektrony z poziomów donorowych, aby uzyskać energię z zakresu pasma przewodnictwa jest w porównaniu z energią, jaką muszą uzyskać elektrony walencyjne, aby przejść do zakresu energii z pasma przewodnictwa około razy .

Ćwiczenie 5



Opór elektryczny właściwy opisuje zdolność materiału do przewodzenia prądu elektrycznego, oznacza się go literą ρ i możemy opisać wzorem $\rho = \frac{RS}{l}$, gdzie R to opór elektryczny elementu, S jego pole przekroju poprzecznego a l długość. Zakładamy, że pole przekroju jest kołem. Jeżeli chcemy zastąpić w obwodzie element o oporze R wykonany z samoistnego germanu elementem wykonanym z domieszkowanego germanu o tej samej długości i oporze elektrycznym właściwym około 1100 razy mniejszym, to jego średnica powinna być około:

- około 33 razy większa
- około 33 razy mniejsza
- około 1100 razy mniejsza
- około 1100 razy większa

Ćwiczenie 6



Wzrost temperatury krzemu od 300 K do 310 K powoduje około dwukrotne zmniejszenie oporu elektrycznego. Czy w takim samym stopniu powinien spadać opór krzemu domieszkowanego fosforem? Uzasadnij odpowiedź.

Ćwiczenie 7



Uzupełnij tekst.

Opór elektryczny półprzewodników domieszkowanych proporcjonalnie do ilości nośników prądu, ponieważ wprowadzone domieszki ruch nośników prądu i ruchliwość nośników w porównaniu z półprzewodnikiem samoistnym.

utrudniają

maleje

rośnie

maleje

nie maleje

ułatwiają

Ćwiczenie 8



Wprowadzenie do materiałów półprzewodnikowych domieszek typu n powoduje między innymi:

zmniejszenie koncentracji elektronów swobodnych

zmniejszenie ruchliwości elektronów swobodnych

zwiększenie koncentracji elektronów swobodnych

zwiększenie ruchliwości elektronów swobodnych

Dla nauczyciela

Konspekt (scenariusz) lekcji

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Półprzewodniki typu n
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	<p>Cele kształcenia – wymagania ogólne</p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.</p> <p>Zakres rozszerzony</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>2) posługuje się materiałami pomocniczymi, w tym tablicami fizycznymi i chemicznymi oraz kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych;</p> <p>19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu;</p> <p>VIII. Prąd elektryczny. Uczeń:</p> <p>1) opisuje przewodnictwo w metalach, elektrolitach i gazach; wyjaśnia proces jonizacji w gazach, wskazuje rolę promieniowania, wysokiej temperatury i dużego natężenia pola elektrycznego.</p>

Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenie 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. charakteryzuje półprzewodnik typu n, 2. objaśnia wpływ domieszek na ilość nośników prądu, 3. tłumaczy, dlaczego domieszki powodują wzrost liczby nośników prądu w półprzewodnikach, a tym samym zmniejszenie oporu elektrycznego, 4. stosuje zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań, 5. analizuje i interpretuje interaktywną animację ilustrującą wpływ domieszek na ilość nośników prądów.
Strategie nauczania:	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe).
Metody nauczania:	burza mózgów, wykład informacyjny,
Formy zajęć:	<ul style="list-style-type: none"> - praca w parach, - praca w grupach.
Środki dydaktyczne:	Symulacja interaktywna, animacje interaktywne ilustrujące wpływ domieszek typu n na koncentrację nośników prądu, zestaw zadań.
Materiały pomocnicze:	<ul style="list-style-type: none"> - rzutnik, - dostęp do Internetu.
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	

Pytania nauczyciela:

1. Co wiecie o półprzewodnikach?

Podsumowanie odpowiedzi: półprzewodniki są stosowane powszechnie w elektronice, przewodzą prąd elektryczny gorzej niż metale.

2. Jakie nośniki prądu występują w półprzewodnikach i jak powstają? Podsumowanie odpowiedzi: elektrony i dziury powstają parami w wyniku urywania się elektronów z wiązań międzyatomowych.

Faza realizacyjna:

Uczniowie w parach oglądają animację, robią notatki i zapisują wnioski, dlaczego wprowadzenie domieszek powoduje wzrost liczby nośników prądu i zmniejszenie oporu elektrycznego półprzewodników.

Nauczyciel pełni rolę doradcy, obserwuje i kontroluje pracę uczniów.

Faza podsumowująca:

Uczniowie w grupach rozwiązują zadania: 1-4 z zestawu ćwiczeń w celu zweryfikowania zdobytej wiedzy.

Praca domowa:

Zadania 5-9 z zestawu ćwiczeń w celu powtórzenia i utrwalenia wiadomości.

**Wskazówki
metodyczne opisujące
różne zastosowania
danego multimedium:**

Może być wykorzystane przy powtórzeniu wiadomości i realizowaniu innych tematów z zakresu półprzewodników.