



Jaka jest struktura półprzewodników?

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Animacja
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela

Jaka jest struktura półprzewodników?

Źródło: dostępny w internecie: <https://lovepik.com/image-605724391/blue-big-data-internet-banner-poster-background.html> [dostęp 21.04.2022 r.].

Czy to nie ciekawe?

Półprzewodniki są materiałami, na właściwościach których bazuje współczesna elektronika. Ich właściwości pozwalają na różnorodne zastosowania. Jakie cechy budowy wewnętrznej powodują takie szerokie możliwości? Tego dowiesz się z tego e-materiału.

Rys. a. Bez półprzewodników trudno nawet wyobrazić sobie współczesny świat.

Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com/photos/main-board-computer-chips-89049/> [dostęp 21.04.2022 r.].

Twoje cele

- dowiesz się, jaka jest budowa wewnętrzna półprzewodników,
- poznasz rodzaje materiałów stosowanych jako półprzewodniki,
- zrozumiesz związek budowy wewnętrznej półprzewodników z przewodzeniem przez nie prądu,
- zastosujesz zdobytą wiedzę w rozwiązywaniu zadań.

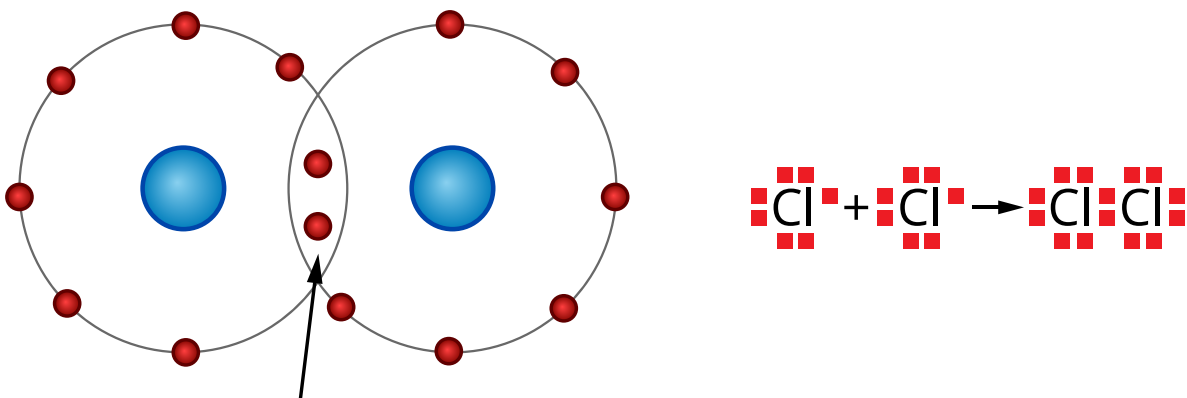
Przeczytaj

Warto przeczytać

Zastosowania półprzewodników wynikają z możliwości modyfikowania ich właściwości elektrycznych. W szczególności opór elektryczny można zmieniać w dosyć szerokim zakresie, przede wszystkim poprzez wprowadzenie domieszek.

Najczęściej stosowanymi materiałami półprzewodnikowymi są pierwiastki grupy czternastej: krzem i german. Półprzewodnikami są również związki pierwiastków z grupy trzynastej i piętnastej – np.: arsenek galu, azotek galu, antymonek indu lub dwunastej i szesnastej – np.: tellurek kadmu. Zazwyczaj materiały półprzewodnikowe są wytwarzane w postaci [monokryształu](#), [polikryształu](#) lub proszku. [Monokryształy](#) są wykorzystywane do produkcji diod, tranzystorów i układów scalonych. W ogniwach fotowoltaicznych, także wyświetlaczach LCD wykorzystuje się krzem [amorficzny](#). Obecnie produkuje się też półprzewodniki organiczne, na ogół wielocykliczne związki aromatyczne, między innymi poli(p-fenyleno-winylen).

Dla nieorganicznych materiałów półprzewodnikowych charakterystyczne jest tzw. [wiązanie kowalencyjne](#), w którym atom uzyskuje pożądaną ilość ośmiu elektronów na ostatniej powłoce udzielniając elektron z atomem, z którym się łączy. Atomy tworzą parę elektronów wiązających, z których każdy pochodzi z innego z łączących się atomów. Przykład takiego wiązania pokazuje Rys. 1.

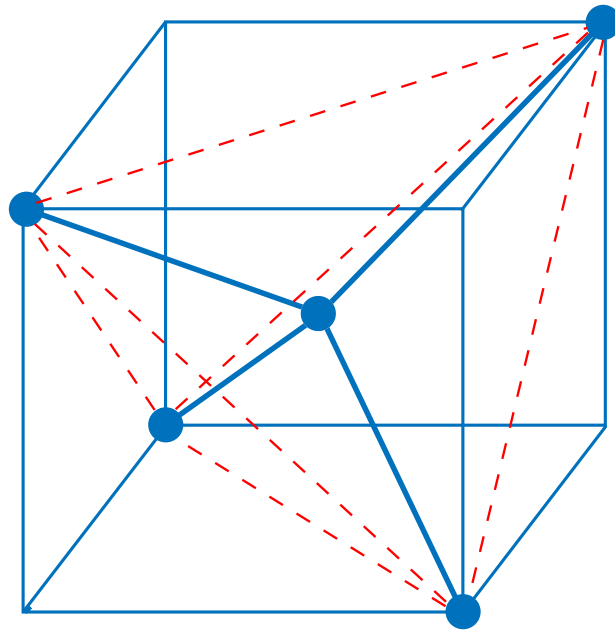


Rys. 1. Wiązanie kowalencyjne między atomami chloru

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

Leżące w czternastej grupie układu okresowego krzem i german mają cztery elektrony walencyjne i uzyskują pożądaną osiem na ostatniej powłoce tworząc [wiązanie kowalencyjne](#)

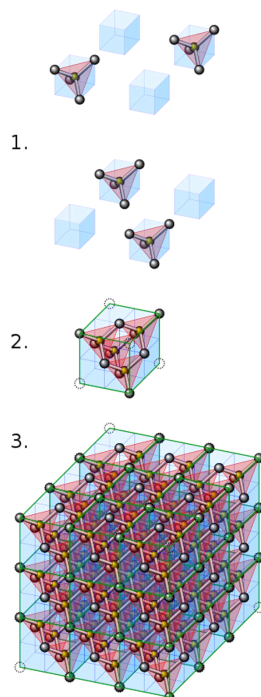
z czterema sąsiadami. Tworzący się układ przestrzenny atomów jest charakterystyczny także dla atomów węgla w strukturze diamentu. Układ ten, typowy dla półprzewodników, można sobie wyobrazić w oparciu o czworościan foremny, w którym cztery atomy krzemu znajdują się w wierzchołkach i jeden w środku czworościanu a każdy z atomów wierzchołka czworościanu jest środkiem kolejnego czworościanu. Atomy leżące w wierzchołkach czworościanu można także umieścić w wierzchołkach sześcianu, jak na Rys. 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie atomów w strukturze diamentu. Czerwone przerywane linie pokazują czworościan wpisany w sześcian.

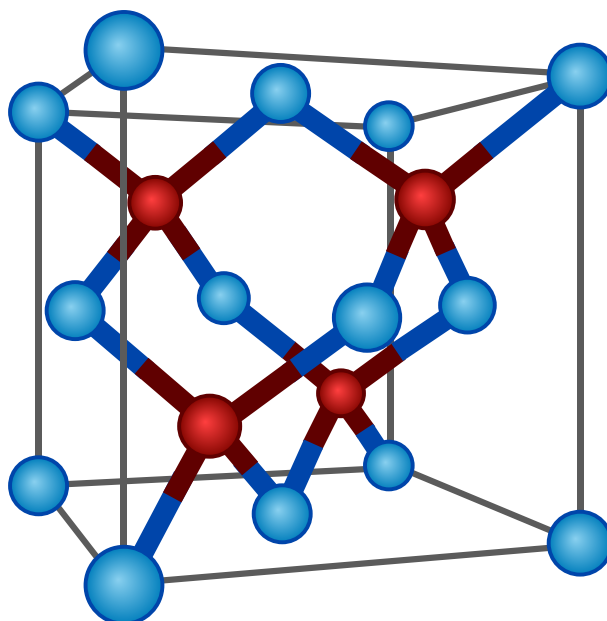
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Przestrzenną strukturę diamentu można odtworzyć składając ją z sześcianów jak na Rys. 3.



Rys. 3. Struktura przestrzenna diamentu: 1. Warstwy budujące komórkę elementarną diamentu. 2. Krystalograficzna komórka elementarna diamentu. 3. Układ przestrzenny atomów w strukturze diamentu
 Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Układ podobny do układu atomów w diamentie tworzą związki półprzewodnikowe między atomami trzynastej i piętnastej grupy (a także w związkach atomów z dwunastej i szesnastej grupy) z tym, że atomy jednego pierwiastka sąsiadują z czterema atomami drugiego, tworząc ze sobą **wiązania kowalencyjne** spolaryzowane. W tworzeniu wiązań kowalencyjnych biorą udział 3 elektrony walencyjne pierwiastków z trzynastej grupy i 5 elektronów pierwiastka z piętnastej grupy układu okresowego (odpowiednio 2 i 6 przy związkach dwunastej i szesnastej i grupy).

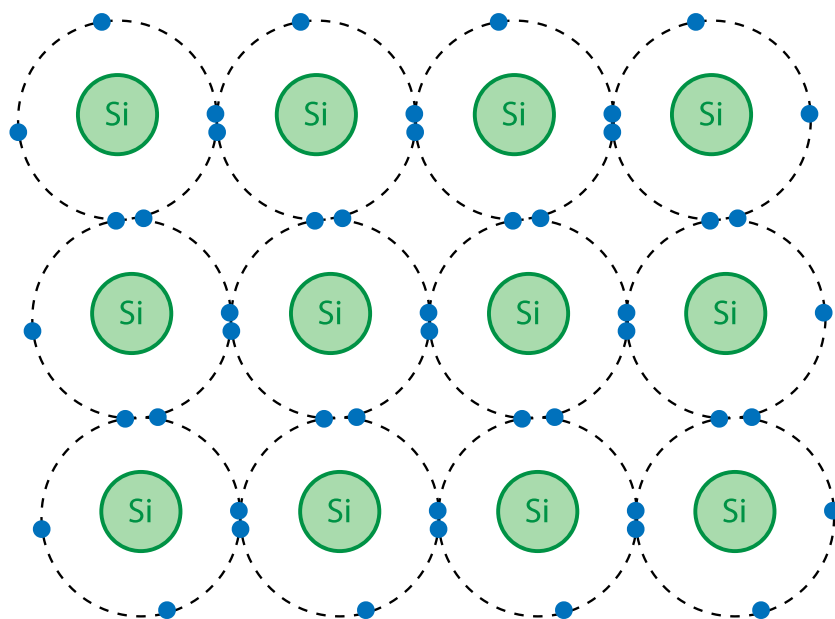


Rys. 4. Komórka elementarna związków półprzewodnikowych trzynastej i piętnastej grupy

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

Dla półprzewodników organicznych typowe jest występowanie pierścieni węglowych, w których występuje podwójne wiązanie między atomami węgla. Ponieważ jedno z tych wiązań jest znacznie słabsze, łatwo ulega zerwaniu uwalniając elektron.

Wiązanie między atomami w strukturze krzemu łatwiej sobie wyobrazić w schemacie dwuwymiarowym – Rys. 5.



Rys. 5. Model wiązań w krzemie w dwóch wymiarach (niebieskie kropki to elektrony)

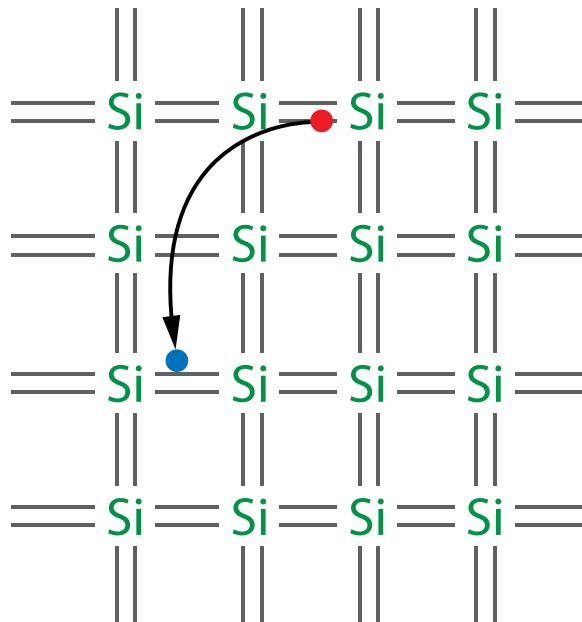
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Materiały, aby mogły przewodzić prąd elektryczny, muszą mieć tzw. swobodne nośniki prądu – czyli cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym i mające możliwość swobodnego ruchu w całej objętości materiału.

W półprzewodnikach, elektrony z **wiązań kowalencyjnych**, w wyniku uzyskania energii od drgających atomów, mogą się uwolnić i stać się elektronami swobodnymi. W temperaturach wyższych niż 0 K istnieje pewna równowagowa ilość uwolnionych elektronów, tym większa im wyższa temperatura. Np. w krzemie w temperaturze 300 K ilość swobodnych elektronów wynosi około $1,5 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$. Dla porównania, w metalach ilość swobodnych elektronów jest rzędu $10^{22}/\text{cm}^3$.

Miejsce po elektronie, który oderwał się z wiązania międzyatomowego może być zajęte przez inny elektron, z sąsiednich wiązań. Elektron ten także pozostawi lukę, która z kolei także może być zajęta przez elektron z sąsiedniego wiązania. Powstaje efekt przemieszczania się pustego miejsca po uwolnionych elektronach. Dla uproszczenia opisu

takiego ruchu elektronów wprowadza się pojęcie **dziury**, czyli braku elektronu w **wiązaniu kowalencyjnym**. **Dziura** jest nośnikiem ładunku dodatniego o wielkości bezwzględnej równej ładunkowi elektronu. **Dziura** jest wygodnym sposobem opisu ruchu luki po uwolnionym elektronie, nie jest jednak samodzielną „cząstką”, taką jak elektron, czy proton - nie da się jej zaobserwować; jest modelem przewodzenia prądu przez półprzewodniki.



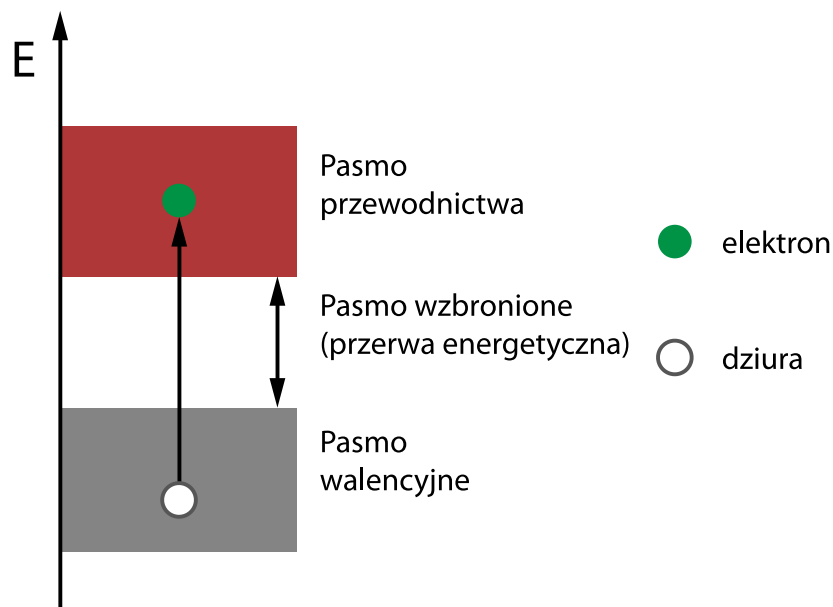
Rys. 6. Schemat powstawania swobodnych elektronów i dziur w półprzewodnikach

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

Bez zewnętrznego pola elektrycznego ruch **dziur** jest chaotyczny i nieuporządkowany podobnie jak swobodnych elektronów.

Tak więc przyjmuje się, że w półprzewodnikach są dwa rodzaje nośników prądu: ujemne elektrony i dodatnie **dziury**. W „czystych”, niedomieszkowanych półprzewodnikach ilość elektronów i **dziur** jest jednakowa, a ich ilość zależy od temperatury – im wyższa, tym więcej elektronów i **dziur**, a zatem mniejszy opór elektryczny półprzewodnika.

Teoria pasmowa ciał stałych (o której możesz przeczytać w e-materiale: „Jak zbudowane są metale”) stwierdza, że elektrony walencyjne, które zyskały energię odpowiadającą pasmu przewodnictwa, pozostawiają 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**.



Rys. 7. Schemat powstawania pary elektron swobodny – dziura.

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

Słowniczek

Monokryształ

(ang. *monocrystal*) ciało stałe zbudowane z jednego kryształu.

Polikryształ

(ang. *polycrystal*) ciało stałe zbudowane z wielu połączonych ze sobą monokryształów.

Ciało amorficzne

(ang. *amorphous solid*) stan skupienia materii charakteryzujący się własnościami mechanicznymi zbliżonymi do ciała krystalicznego, w którym nie występuje uporządkowanie dalekiego zasięgu. Ciało będące w stanie amorficznym jest ciałem stałym, ale tworzące je cząsteczki są ułożone w sposób dość chaotyczny, bardziej zbliżony do spotykanego w cieczach.

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.

Animacja

Jaka jest struktura półprzewodników?

Poniższa animacja pokazuje schemat wiązań w typowym półprzewodniku - krzemie oraz ilustruje powstawanie swobodnych elektronów i dziur w półprzewodnikach i ich chaotyczny ruch.

Trwa wczytywanie danych ..

Film dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/DbjBqiCtY>

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

Opis alternatywny animacji 3D.

Na ciemnym polu pojawia się wiele trójwymiarowych szarych i półprzezroczystych sześciątów, w których widoczne są dwa kolejne nieco jaśniejsze, przy czym najbardziej środkowe są prawie białe. Zbiegają się one i po chwili tworzą jeden biały mały, jasny sześciąt na czarnym tle, po prawej stronie ekranu w połowie jego wysokości. Obok, po prawej stronie, pojawia się biały napis jaka jest struktura półprzewodników? Na ciemnym tle widoczne są dwie płytki drukowane PCB, zielonym kolorze na których zamontowano wiele elementów elektronicznych, takich jak rezystory, kondensatory, cewki oraz bardziej złożonych, jak mikroprocesory i kości pamięci.

Najprawdopodobniej płytki te przedstawiają płytę główną wyjętą z komputera. Część z tych elementów zbudowana jest z półprzewodników, czyli materiałów których przewodnictwo zależy od warunków zewnętrznych np. temperatury. Po chwili na ekranie widoczne jest zbliżenie na inną, pojedynczą płytkę PCB z zamontowanymi elementami elektronicznymi. Po chwili na tle pojawia nieruchomej płytki drukowanej pojawia się dwuwymiarowy schemat atomu krzemu. Atom krzemu narysowany jest



w formie pomarańczowego jądra z centralnym podpisem wielka litera S i mała litera i. Wokół jądra widoczne są powłoki elektronowe w postaci okręgów narysowanych białymi liniami. Tło znika i po chwili staje się czarne a na ekranie widać jedynie model atomu krzemu. Po chwili na powłokach elektronowych pojawiają się elektrony w postaci niebieskich kulek. Dwa na pierwszej, najbliższej jądra atomowemu, osiem na drugiej i cztery na najbardziej oddalonej od jądra, czyli walencyjnej. Powłoka walencyjna jest opisana białym napisem. Elektrony znajdujące się na powłoce walencyjnej odpowiadają za wiązania z czterem sąsiadującymi atomami w materii. Wiązanie te nazywane są wiązaniami kowalencyjnymi. Po chwili wewnętrzne powłoki walencyjne znikają i jądro atomu krzemu widoczne jest w postaci uproszczonej, jako pomarańczowe podpisane jądro i otaczającą je powłoką walencyjną z czterem elektronami. Po prawej stronie uproszczonego modelu atomu pojawia się biały napis model atomu krzemu w nawiasie wielka litera S i mała litera i. Pod tym podpisem widoczny jest mniejszymi literami napis widoczne są tylko cztery elektrony walencyjne. Po chwili na ekranie pojawiają się jeszcze osiem takich samych atomów krzemu tworzących kwadrat, w którego środku znajduje się opisany wcześniej atom krzemu. Pomiędzy wszystkimi sąsiadującymi ze sobą atomami widoczne są niebieskie elipsy na końcach których widać elektrony walencyjne sąsiadujących atomów. Niebieskie elipsy symbolizują wiązania kowalencyjne. W lewym dolnym rogu ekranu widać biały podpis widocznego obrazu: model przewodnika samoistnego. Po prawej stronie atomów pojawiają się dwa poziome prostokąty jeden nad drugim. U góry znajduje się prostokąt niebieski a pod nim fioletowy. Nad niebieskim prostokątem widać biały napis pasmo przewodnictwa. Pomiędzy prostokątami w wolnej czarnej przestrzeni widoczny jest biały napis pasmo wzbronione a pod fioletowym prostokątem widoczny jest biały napis pasmo walencyjne. Prostokąty symbolizują pasma, czyli zakresy energii jakie mogą przyjmować elektrony znajdujące się w nich. Po lewej stronie atomów krzemu pojawia się biały napis temperatura zero kelwinów. W tej temperaturze wszystkie elektrony znajdują się w paśmie walencyjnym a pole elektryczne nie może zmienić ich położenia ani pędu. Zatem, jeżeli nie ładunki w postaci elektronów nie mogą się poruszać, to nie może w takim materiale płynąć prąd elektryczny będący ukierunkowanym ruchem ładunków. Po chwili na ekranie zaprezentowane jest sytuacja, w której temperatura wzrasta z zera kelwinów do temperatury pokojowej. Informacja taka pojawia się w postaci białego napisu po prawej stronie od atomów krzemu. W takim przypadku część elektronów przechodzi z pasma walencyjnego, przez pasmo wzbronione czyli obszar pomiędzy prostokątami niebieskim i fioletowym do pasma przewodnictwa. Część elektronów znajdujących się

w niebieskich elipsach pomiędzy atomami krzemu zaczyna się z nich uwalniać i odlatywać a na ich miejscu powstaje czerwona kulka symbolizująca dziurę elektronową. Dziura elektronowa to miejsce pozostałe po brakującym elektronie walencyjnym. Dziura elektronowa również jest ładunkiem elektrycznym o wartości dodatniej równej ładunkowi elektronu. Jeżeli będzie się ona poruszać to także powstanie prąd elektryczny płynący w kierunku przeciwnym do tego wywołanego ruchem elektronów. Elektrony walencyjne wybijane są z atomów pod wpływem energii termicznej dostarczanej z otoczenia lub wskutek wzbudzeń fotonowych. Uwalnianie elektronów jest samoistne. Liczba wybitych elektronów rośnie wraz z temperaturą, ponieważ w wyższej temperaturze do atomów dostarczana jest większa ilość energii termicznej. Zatem w wyższej temperaturze więcej ładunków w postaci elektronów i pozostałych po nich dziur elektronowych poddana jest ruchowi. Skutkiem tego jest zwiększone przewodnictwo prądu elektrycznego, który zależy od ilości poruszających się ładunków i oraz ich ruchliwości, która na animacji zaprezentowana jest w postaci szybciej poruszających się niebieskich kulek reprezentujących elektrony. Warto wiedzieć, że najpopularniejszymi materiałami półprzewodnikowymi stosowanymi w elektronice są właśnie krzem i german. Na białym tle widoczny jest niebieski i umieszczony centralnie napis Fizyka dziewięćset pięćdziesiąt kapsulek. Poniżej widoczne są trzy loga. W lewym dolnym rogu ekranu logo wydziału fizyki politechniki warszawskiej zawierające czarny kontur falistego kształtu otoczony czarnym prostokątem oraz czarny napis Wydział Fizyki Politechnika Warszawska. Na środku ekranu na dole znajduje się logo zawierające niebieski trapez o pionowych podstawach na tle którego widać trzy gwiazdki: białą, żółtą i czerwoną. Obok znajduje się czarny napis Fundusze Europejskie Wiedza Edukacja Rozwój. W prawym dolnym rogu znajduje się czarny napis Unia Europejska po której prawej stronie widoczna jest flaga Unii Europejskiej.

Polecenie 1

Polecenie 2

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4



Ćwiczenie 5



Ćwiczenie 6



Ćwiczenie 7



Ćwiczenie 8



Dlaczego wzrost temperatury powoduje w półprzewodnikach zmniejszenie oporu elektrycznego w przeciwieństwie do metali, dla których wzrost temperatury powoduje wzrost oporu?

Dla nauczyciela

Scenariusz lekcji

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Budowa wewnętrzna półprzewodników
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

<p>Podstawa programowa:</p>	<p>Cele kształcenia – wymagania ogólne</p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.</p> <p>Zakres podstawowy</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu;</p> <p>VII. Prąd elektryczny. Uczeń:</p> <p>2) rozróżnia metale i półprzewodniki: omawia zależność oporu od temperatury dla metali i półprzewodników.</p> <p>Zakres rozszerzony</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</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>
<p>Kształtowane kompetencje kluczowe:</p>	<p>Zalecenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:</p> <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. tłumaczy model budowy wewnętrznej półprzewodników, w tym elementy teorii pasmowej. 2. wyjaśnia związek między budową wewnętrzną a obserwowanymi właściwościami. 3. stosuje modele budowy wewnętrznej do wyjaśnienia właściwości makroskopowych.
Strategie nauczania:	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe)
Metody nauczania:	wykład problemowy, burza mózgów, pokaz multimedialny
Formy zajęć:	Praca zespołowa, praca w parach
Środki dydaktyczne:	Rzutnik multimedialny, rysunki i zdjęcia pokazujące budowę wewnętrzną półprzewodników w wersji elektronicznej, animacja pokazująca powstawanie elektronów swobodnych i dziur, zestawy zadań
Materiały pomocnicze:	brak
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
<p>Nauczyciel zadaje pytanie: co wiecie o zastosowaniach półprzewodników? Uczniowie przy ewentualnym naprowadzeniu przez nauczyciela powinni wymienić kilka: prostowanie prądu, diody świecące, tranzystory.</p> <p>Drugie pytanie: czy wiecie, jakiego rodzaju materiały stosuje się jako półprzewodniki? Przy udziale nauczyciela ustalamy rodzaje stosowanych materiałów (np. krzem, german, arsenek galu).</p>	
Faza realizacyjna:	

Pytanie nauczyciela: Jaki jest mechanizm tworzenia wiązań chemicznych ? Czego można oczekiwać od pierwiastków 14 grupy skoro mają 4 elektrony walencyjne? – Ustalenie, że powinny tworzyć wiązanie kowalencyjne z czterema sąsiadami. Nauczyciel informuje o podobnym mechanizmie w związkach pierwiastków 13 i 15 grupy i 12 i 16. Pokazuje zdjęcia układu przestrzennego atomów w kryształach półprzewodnikowych i półprzewodnikach organicznych.

Pytania nauczyciela: jaki warunek musi spełniać materiał, aby mógł przewodzić prąd elektryczny? Oczekiwana odpowiedź uczniów – swobodne nośniki.

Pytanie nauczyciela: skąd mogą się brać swobodne nośniki w półprzewodnikach? W toku dyskusji wyłania się model elektronów urywających się w wyniku uzyskania energii cieplnej od atomów i pozostawianych przez nie dziur.

Nauczyciel krótko omawia model pasmowy półprzewodników.

Faza podsumowująca:

Uczniowie rozwiązują zadania 1-5 w celu sprawdzenia zrozumienia omawianych na lekcji wiadomości.

Praca domowa:

Zadania 6-8 w celu powtórzenia i utrwalenia wiadomości.

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

Multimedium może być wykorzystywane na każdej lekcji, na której omawiane będą właściwości półprzewodników, także przy powtarzaniu wiadomości.