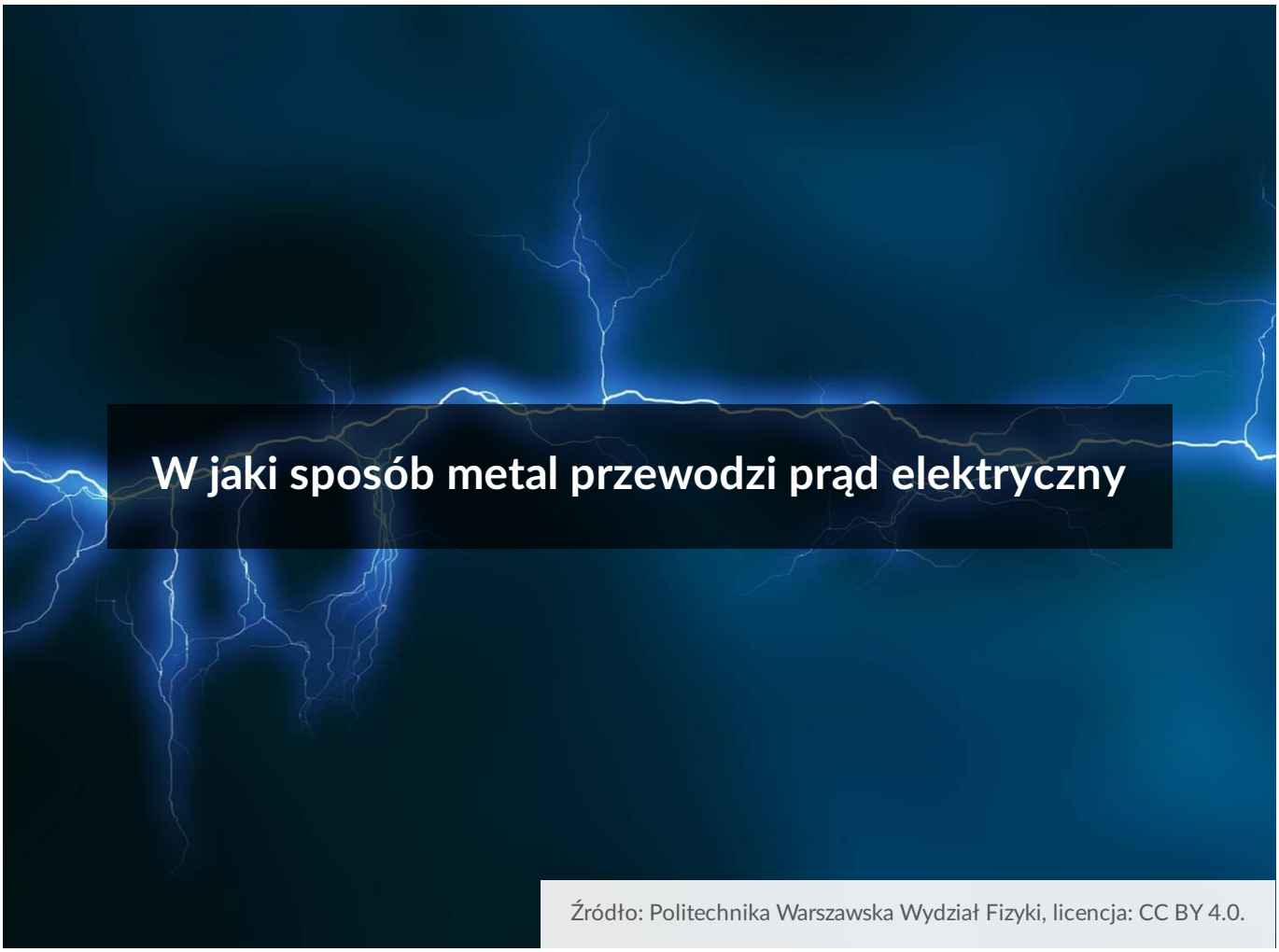


W jaki sposób metal przewodzi prąd elektryczny

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



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

Czy to nie ciekawe?

Wyjaśnianie obserwowanych własności makroskopowych różnych materiałów na podstawie ich budowy wewnętrznej jest jednym z podstawowych zadań fizyki. Z tego e-materiału dowiesz się, w jaki sposób budowa metali na poziomie mikroskopowym wpływa na przewodnictwo elektryczne tych materiałów.



Rys. a. W tradycyjnych żarówkach ciałem świecącym jest silnie rozgrzane przepływem prądu włókno wykonane z trudno topliwego metalu – wolframu.
Źródło: dostępny w internecie: https://pixabay.com/photos/lightbulb-light-glow-shining-2132354/ [dostęp 20.04.2022 r.].

Twoje cele

- dowiesz się, jak poruszają się elektrony w metalach,
- poznasz tzw. klasyczny model przewodnictwa,
- zrozumiesz wpływ wewnętrznej struktury materii na przewodnictwo elektryczne,
- zastosujesz wzory pozwalające opisać ruch elektronów w metalu pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Prądem elektrycznym nazywa się uporządkowany przepływ nośników ładunku elektrycznego. Nośnikami są cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym mające możliwość swobodnego ruchu w całej objętości ciała. W przypadku metali takimi cząstkami są elektrony z ostatniej powłoki elektronowej, które są uwalniane w trakcie tworzenia się wiązań między atomami metalu. Ostatecznie **sieć krystaliczną metalu** tworzą **dodatnie jony** zanurzone w chmurze chaotycznie poruszających się tzw. **elektronów swobodnych**, zwanych również **elektronami przewodnictwa**.
W zależności od wartościowości atomów metalu, w trakcie tworzenia wiązań metalicznych, jeden atom może uwalniać od jednego do trzech elektronów. Liczba takich uwolnionych elektronów w bezpośredni sposób przekłada się na ilość nośników ładunku. Jest więc ona jednym z czynników, które wpływają na zdolność metalu do przewodzenia prądu.

Zdolność metalu do przewodzenia prądu elektrycznego można opisać wielkością fizyczną zwaną **oporem elektrycznym właściwym**. Opór właściwy jest inaczej zwany rezystywnością. Oznacza się go grecką literą ρ (czyt. 'ro'). Jednostką rezystywności jest Ω·m, tj. iloczyn oma i metra. Rezystywność jest stałą charakteryzującą dany materiał, która przyjmuje różne wartości dla różnych materiałów. Na przykład, rezystywność miedzi wynosi $1{,}72 \cdot 10^{-8}$Ω·m. Oznacza to, że opór elektryczny wykonanego z miedzi przewodnika o długości 1 metra i powierzchni przekroju 1 m^2 jest równy $1{,}72 \cdot 10^{-8}$ Ω. Ogólnie, im mniejszy opór właściwy materiału, tym lepiej materiał ten przewodzi prąd elektryczny.

W poniższej tabeli zestawiono przykładowe wartości oporu właściwego różnych materiałów:

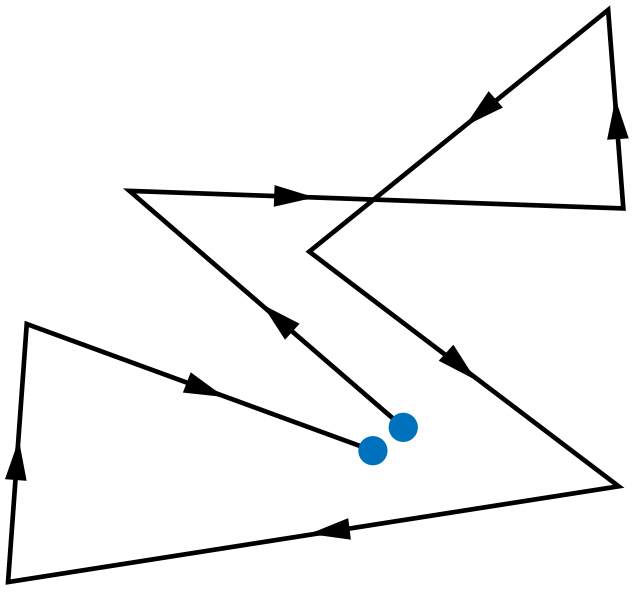
Materiał	**Opór elektryczny właściwy (Ω·m)**
srebro	$1{,}59 \cdot 10^{-8}$
miedź	$1{,}72 \cdot 10^{-8}$

aluminium	$2{,}82 \cdot 10^{-8}$
wolfram	$5{,}6 \cdot 10^{-8}$
żelazo	$10 \cdot 10^{-8}$
german	0,46
krzem	640
szkło	10^{10}–10^{14}

Opór elektryczny właściwy można powiązać z mikroskopowymi właściwościami materiału. W szczególności zależy on od koncentracji nośników ładunku i ich ruchliwości. Można o tym przeczytać w e-materiale pt. *Zależność oporu właściwego od ruchliwości nośników ładunku.*

Ruch elektronów swobodnych w metalach nie jest w pełni „swobodny", ponieważ w trakcie ruchu oddziałują one z innymi elektronami, a przede wszystkim z jonami sieci krystalicznej. Specyfikę tego ruchu opisuje tzw. **klasyczny model przewodnictwa.** Poniżej, w ogromnym uproszczeniu, przedstawiono podstawowe założenia i wnioski tego modelu.

Bez zewnętrznego pola elektrycznego elektrony wykonują chaotyczne ruchy termiczne, zderzając się ze sobą i z jonami sieci krystalicznej. W wyniku takiego ruchu, średnie położenie elektronów praktycznie się nie zmienia (Rys. 1.).



Rys. 1. Przykładowy tor elektronu podczas jego chaotycznego, termicznego ruchu w metalu.
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Z powodu efektów kwantowych, a w szczególności z uwagi na zakaz Pauliego, który nie pozwala na obsadzenie przez wszystkie elektrony najniższego stanu energetycznego, średnia prędkość elektronów w metalach, związana z ich chaotycznym ruchem termicznym, jest wyższa od prędkości cząstek w klasycznym gazie doskonałym o tej samej temperaturze. Jest ona rzędu 10^6 m/s.

Jeżeli do końców przewodnika o długości l przyłożymy napięcie elektryczne U, to pojawi się w nim pole elektryczne o natężeniu:

$$E = \frac{U}{l}.$$

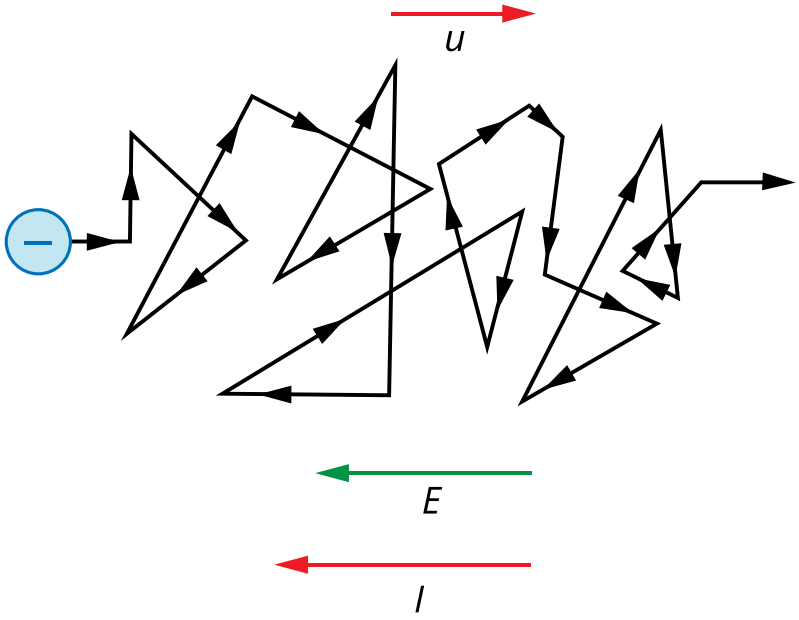
Pod wpływem tego zewnętrznego pola, zgodnie z drugą zasadą dynamiki, elektrony doznają przyspieszenia:

$$a = \frac{F}{m},$$

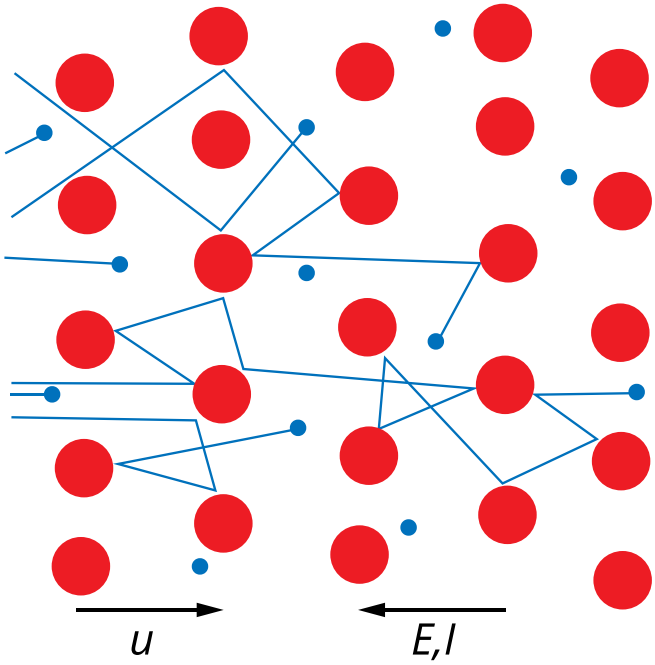
gdzie $F = eE$ jest siłą, z jaką pole elektryczne działa na elektron o ładunku e. Przyśpieszenie elektronu wynosi zatem:

$$a = \frac{eE}{m}.$$

Przyśpieszony ruch elektronu trwa dosyć krótko, bo do chwili jego zderzenia się z jonem sieci krystalicznej. W wyniku takiego zderzenia elektron traci praktycznie całą swoją energię kinetyczną. Wyhamowany elektron nie pozostaje jednak w spoczynku - jest ponownie przyspieszany przez pole elektryczne, znowu zderza się z jednym z jonów sieci krystalicznej itd. Efekt ten powoduje dodanie do prędkości ruchów termicznych dodatkowej, ukierunkowanej prędkości średniej u, która z powodu ujemnego ładunku elektronu, ma kierunek przeciwny do natężenia zewnętrznego pola elektrycznego. Prędkość ta nosi nazwę średniej **prędkości dryfu** (Rys. 2).
W przewodniku zaczyna płynąć prąd elektryczny o natężeniu I (Rys. 3.).



Rys. 2. Dryf elektronu pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.



Rys. 3. Dryfujące elektrony zderzają się z jonami sieci krystalicznej.
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Zakładając, że między zderzeniami z jonami sieci ruch elektronu jest jednostajnie przyśpieszony, z przyśpieszeniem $a = \frac{eE}{m}$, oraz przyjmując, że w wyniku zderzenia elektron przekazuje sieci krystalicznej całą swą energię kinetyczną, możemy obliczyć prędkość, jaką rozwija elektron w swoim ruchu swobodnym:

$$v = a\tau,$$

gdzie τ jest średnim odstępem czasu między kolejnymi zderzeniami dryfującego elektronu z jonami sieci krystalicznej. Ponieważ w ruchu jednostajnie przyśpieszonym bez prędkości początkowej, prędkość średnia jest średnią arytmetyczną prędkości początkowej (która jest równa zero) i końcowej otrzymujemy:

$$u = \frac{v}{2} = \frac{eE\tau}{2m}.$$

Z otrzymanego wzoru wynika, że o prędkości dryfu, poza zewnętrznym polem elektrycznym, decyduje średni odstęp czasu między zderzeniami elektronów z jonami sieci. Parametr ten zależy od wielu czynników (m.in. temperatury, budowy krystalicznej metalu, defektów struktury krystalicznej, zanieczyszczeń) i, jak się okazuje, w istotny sposób wpływa on na opór elektryczny materiału.

Średnia prędkość dryfu elektronów jest rzędu 10^{-4} m/s. Jest ona bardzo mała w porównaniu z prędkością ruchów termicznych, która jest rzędu 10^{6} m/s, a jest tego samego rzędu co prędkość, z jaką przemieszcza się ślimak winniczek.

Klasyczna teoria przewodnictwa dosyć dobrze opisuje zjawisko przewodnictwa elektrycznego w metalach. Teoria ta nie radzi sobie jednak z wyjaśnieniem doświadczalnie obserwowanej zależność oporu elektrycznego od temperatury. Przyczyną wspomnianej porażki klasycznej teorii przewodnictwa jest to, że nie uwzględnia ona wpływu jonów sieci na ruch elektronów miedzy zderzeniami. Bliższe rzeczywistości rezultaty daje kwantowa teoria przewodnictwa, w której opisuje się elektrony jako cząstki podlegające statystykom kwantowym, poruszające się w periodycznym polu elektrycznym wytwarzanym przez dodatnie jony sieci krystalicznej.

Słowniczek

> **Dryf elektronów**
>
> (*ang.: drift*) przemieszczanie się elektronów w sposób uporządkowany pod wpływem zewnętrznego czynnika wymuszającego – np. pola elektrycznego.

> **Koncentracja nośników**

(*ang.: carrier concentration*) ilość nośników ładunku w jednostce objętości materiału.

Ruchliwość nośników

(*ang.: carrier mobility*) wielkość opisująca wpływ zewnętrznego pola elektrycznego E na średnią prędkość dryfu nośników u wyrażona wzorem: $\mu = \frac{u}{E}$.

Ruchy termiczne

(*ang.: thermal movements*) nieustanne, chaotyczne ruchy cząstek, atomów, jonów i elektronów swobodnych tworzących każde ciało, o energii kinetycznej zależnej od temperatury.

Zakaz Pauliego

(*ang.: Pauli exclusion principle*) dwie identyczne cząstki o spinie połówkowym, jakimi są na przykład elektrony, nie mogą zajmować tego samego stanu energetyczno-spinowego.

Animacja

Ruch elektronów w przewodniku w trakcie przepływu prądu

Animacja pokazuje ruch elektronów w przewodniku i rozpraszanie energii w wyniku zderzeń z jonami sieci.

Trwa wczytywanie danych ..

Film dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/DT6sydid1

Opis alternatywny animacji 3D.
Animacja przedstawia zachowanie się elektronów w przewodniku. Animację rozpoczyna czarny slajd tytułowy, na którym po środku umieszczono, dużymi literami, biały napis "W JAKI SPOSÓB METALE PRZEWODZĄ PRĄD ELEKTRYCZNY". Następnie rozpoczyna się film animowany, na którym przedstawiono, na czarnym tle żółty schemat układu elektrycznego. Na dole ekranu narysowano symbol ogniwa elektrycznego w postaci dwóch pionowych, umieszczonych obok siebie, równoległych kresek symbolizujących okładki. Okładka symbolizowana krótszą z nich po stronie lewej jest naładowana ujemnie, więc została oznaczona znakiem minus a symbolizowana dłuższą z prawej strony naładowana dodatnio więc została oznaczona znakiem plus. Po prawej stronie ogniwa umieszczono włącznik w postaci dwóch punktów z poprzeczką, która morze się odchylać rozłączając obwód elektryczny. obwód został zamknięty wzdłuż krawędzi ekranu jedną długą linią w kształcie prostokąta. W trakcie filmu na ekranie pojawia się białe kółko, którego wnętrze stanowi symboliczne powiększenie przewodnika, którym zamknięto obwód. Na tym powiększeniu widzimy białą prostokątną siatkę z białymi kulkami w miejscach przecięć linii sieci obrazującą sieć atomów tworzących przewodnik. Oprócz tego na

powiększeniu umieszczono niebieskie kulki z białymi znaczkami minus symbolizujące swobodne elektrony. Kiedy włącznik w obwodzie jest rozwarty prąd nie płynie a elektrony swobodne poruszają się w sposób przypadkowy. Kiedy włącznik zostaje zwarty a obwód zamknięty zaczyna płynąć prąd, oznaczony dużą żółtą literą I w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara co oznaczono żółtą strzałką, a elektrony zaczynają się poruszać w sposób ukierunkowany po obwodzie w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu prądu. Animację kończy biały, cieniowany na dole, slajd końcowy, w którego środku umieszczono logo projektu, składające się z niebieskich, zamalowanych w środku, obiektów przypominających elipsy rozmieszczonych na powierzchni przypominającej fragment koła. Logo to również zawiera niebieski napis zapisany dużymi literami o treści "FIZYKA 950 KAPSUŁEK". Na dole ekranu umieszczono dodatkowe trzy loga w poziomie obok siebie. Są to kolejno od lewej: logo w postaci prostokąta w którym zawarto dwie umieszczone pod sobą identyczne gasnące fale, z czarnym napisem po prawej stronie którego wyrazy rozpoczynają się z dużych liter "Wydział Fizyki" a pod nim mniejszą czarną czcionką dużymi literami tekst "POLITECHNIKA WARSZAWSKA", logo składające się z trzech pięcioramiennych gwiazdek w kolorach żółtym, białym i czerwonym na granatowym tle, po którego prawej stronie znajduje się czarny napis, którego wyrazy rozpoczynają się z dużych liter, treści: "Fundusze Europejskie Wiedza Edukacja Rozwój" oraz logo składające się z granatowej flagi ze złotymi dwunastoma gwiazdami ułożonymi w kształt okręgu z czarnym napisem po lewej stronie, którego wyrazy rozpoczynają się z dużych liter, treści "Unia Europejska".

> **Polecenie 1**

> **Polecenie 2**
> Skoro prawdą jest, że energia wydzielona w przewodniku, przez który przepływa prąd elektryczny zwiększa się proporcjonalnie do czasu (tzw. prawo Joule'a-Lenza) wyjaśnij, dlaczego włókno żarówki może pracować bardzo długo i nie topi się pod wpływem prądu?

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

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

Ćwiczenie 2

Ćwiczenie 3

Ćwiczenie 4

Opór elektryczny właściwy srebra wynosi $1{,}59 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, a żelaza $10^{-7} \Omega \cdot m$. Wyjaśnij, który z wymienionych metali jest lepszym przewodnikiem.

Ćwiczenie 5

Ćwiczenie 6

Oblicz przyśpieszenie, jakiego doznają elektrony w przewodniku o długości 1 m, jeżeli do jego końców przyłożymy napięcie 9 V. Załóż, że ładunek elektryczny elektronu jest (co do wartości, bo znak ładunku jest ujemny) równy $e=1{,}6 \cdot 10^{-19} C$, a jego masa wynosi $m=9{,}1 \cdot 10^{-31} kg$.

Ćwiczenie 7

Ćwiczenie 8

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**W jaki sposób metale przewodzą prąd elektryczny**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

Podstawa programowa	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. **Zakres podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 3) prowadzi obliczenia szacunkowe i poddaje analizie otrzymany wynik; 15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. VII. Prąd elektryczny. Uczeń: 2) rozróżnia metale i półprzewodniki: omawia zależność oporu od temperatury dla metali i półprzewodników. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 3) prowadzi obliczenia szacunkowe i poddaje analizie otrzymany wynik; 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. VIII. Prąd elektryczny. Uczeń: 1)opisuje przewodnictwo w metalach, elektrolitach i gazach; wyjaśnia procesy jonizacji w gazach, wskazuje rolę promieniowania, wysokiej temperatury i dużego natężenia pola elektrycznego.

Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.** • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. wyjaśnia budowę wewnętrzną metali, 2. wylicza i porównuje wielkości mogące wpływać na przewodzenie prądu, 3. streszcza klasyczny model przewodnictwa, 4. stosuje zdobyta wiedzę w rozwiązywaniu zadań, 5. analizuje animację 3D poświęconą przewodnictwu prądu przez metale.
Strategie nauczania	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe)
Metody nauczania	wykład informacyjny, burza mózgów, pokaz multimedialny
Formy zajęć:	praca zespołowa, praca w parach
Środki dydaktyczne:	symulacja interaktywna, rzutnik
Materiały pomocnicze:	e-materiał: „Zależność oporu właściwego od ruchliwości nośników ładunku”
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	

Nauczyciel stawia pytanie: Jaki jest związek między budową mikroskopową metali i przewodzeniem prądu, w szczególności z oporem elektrycznym? Nauczyciel razem z uczniami przypomina podstawowe wiadomości o prądzie elektrycznym i podstawowych wielkościach opisujących prąd oraz wiadomości o budowie metali.	
Faza realizacyjna:	
Pytanie nauczyciela: jakie elementy budowy wewnętrznej mogą wpływać na przepływ prądu? Efektem dyskusji powinno być stwierdzenie, że tymi elementami są: ilość nośników prądu i opory, jakie napotykają w trakcie ruchu. Nauczyciel zapoznaje uczniów z klasycznym modelem ruchu elektronów w metalu na bazie animacji. Zwraca uwagę na różnice w wartościach prędkości termicznej i prędkości dryfu. Na podstawie modelu klasycznego uczniowie, korzystając ze wskazówek nauczyciela, wyprowadzają zależność między prędkością dryfu i natężeniem zewnętrznego pola elektrycznego. Na podstawie symulacji multimedialnej uczniowie powinni zauważyć wpływ wzrostu temperatury na prędkość dryfu elektronów, a zatem i na opór właściwy. Nauczyciel informuje o ograniczeniach modelu klasycznego.	
Faza podsumowująca:	
Uczniowie rozwiązują zadania z zestawu ćwiczeń: 1-4. Nauczyciel wspiera uczniów w realizacji zadania.	
Praca domowa:	
Rozwiązanie zadań z zestawu ćwiczeń: 5-8 w celu utrwalenia wiadomości zdobytych na lekcji.	
Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium	Animacja może być wykorzystywana na zajęciach, na których omawiany będzie związek między szybkością nośników a natężeniem prądu i związku oporu elektrycznego właściwego z ruchliwością nośników.