



Czy i dlaczego opór półprzewodników jest zależny od temperatury?

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film samouczek
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



Czy i dlaczego opór półprzewodników jest zależny od temperatury?

Źródło: dostępny w internecie: <https://lovepik.com/image-605724391/blue-big-data-internet-banner-poster-background.html> [dostęp 11.07.2022].

Czy to nie ciekawe?

Typową właściwością metali jest wzrost oporu elektrycznego wraz ze wzrostem temperatury. Dla półprzewodników samoistnych – bez domieszek wzrost temperatury powoduje spadek oporu. Natomiast w półprzewodnikach domieszkowych w zależności od rodzaju materiału i zakresu zmian temperatur opór elektryczny może maleć, być praktycznie stały, a nawet rosnać wraz ze wzrostem temperatury.

Twoje cele

- Dowiesz się, jakie czynniki wpływają na opór elektryczny materiałów,
- Poznasz wpływ temperatury na koncentrację i ruchliwość nośników,
- Zrozumiesz, dlaczego i jak temperatura wpływa na opór elektryczny półprzewodników,
- Zastosujesz zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań,
- Przeanalizujesz i zinterpretujesz wykresy zależności koncentracji i ruchliwości nośników od temperatury i oporu właściwego od temperatury.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Zdolność materiału do przewodzenia prądu elektrycznego można opisać wielkością fizyczną nazywaną **oporem elektrycznym właściwym**. Oznacza się go literą ρ , jednostką jest Ωm .

Opór elektryczny właściwy możemy opisać wzorem:

$$\rho = \frac{RS}{l} \quad (1)$$

gdzie ρ – **opór elektryczny właściwy**, R – opór elektryczny elementu, S – pole przekroju poprzecznego elementu, l – długość elementu.

Im mniejszy **opór elektryczny właściwy** materiału, tym lepiej przewodzi prąd elektryczny.

Opór elektryczny właściwy związany jest z właściwościami mikroskopowymi materiału poprzez koncentrację nośników n i ruchliwość nośników μ .

Koncentracja nośników oznaczana jest literą n . Jest to ilość nośników w jednostce objętości materiału.

Ruchliwość nośników oznacza się literą μ . Opisuje ona wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na średnią prędkość **dryfu** nośników. Wyrażamy ją wzorem:

$$\mu = \frac{u}{E} \quad (2)$$

gdzie u – średnia prędkość dryfu nośników, E – wartość **natężenia zewnętrznego pola elektrycznego**.

Natężenie pola elektrycznego jest wielkością fizyczną opisującą siłę, z jaką pole elektryczne działa na ładunki elektryczne:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \quad (3)$$

gdzie \vec{F} – siła, z jaką pole elektryczne działa na ładunek q , \vec{E} – natężenie pola elektrycznego.

Związek między [oporem elektrycznym właściwym](#) a ruchliwością i koncentracją nośników wyraża wzór:

$$\rho = \frac{1}{en\mu} \quad (4)$$

gdzie $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ – ładunek elementarny.

W półprzewodnikach występują dwa rodzaje nośników prądu: elektrony – nośniki ładunku ujemnego i dziury, które są nośnikami ładunku dodatniego. Koncentracja tych nośników zależy od temperatury, a także od domieszek, wprowadzanych właśnie w celu zmiany koncentracji nośników.

Półprzewodniki samoistne

W półprzewodnikach wzrost temperatury powoduje wzrost energii drgań atomów sieci krystalicznej, co istotnie zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania przez elektrony walencyjne energii z zakresu pasma przewodnictwa. Przejściu elektronu walencyjnego do stanu przewodnictwa towarzyszy powstanie dziury w pasmie walencyjnym – jednocześnie powstaje para nośników prądu przeciwnego znaku. Dlatego, w półprzewodnikach samoistnych koncentracja nośników obu rodzajów jest jednakowa. Więcej o pasmowej teorii przewodnictwa możesz przeczytać w e-materiale „Jak zbudowane są metale”. Wpływ temperatury na koncentrację nośników w półprzewodnikach samoistnych przedstawia tabela (Rys. 1.).

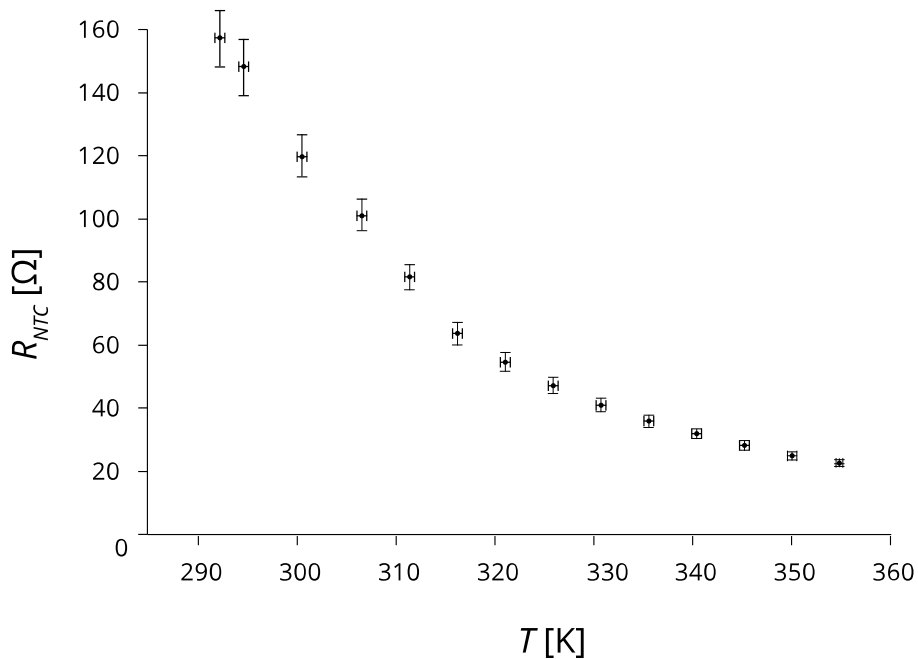
Rys. 1. Koncentracja nośników samoistnych w półprzewodnikach w różnych temperaturach

T[K]	$n_1 [m^{-3}]$		
	Si	Ge	GaAs
200	$6,1 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{16}$	10^6
300	$1,5 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{19}$	10^{13}
500	$9,2 \cdot 10^{19}$	$7,7 \cdot 10^{21}$	$6,1 \cdot 10^{17}$
700	$1,0 \cdot 10^{22}$	$2,7 \cdot 10^{23}$	$1,7 \cdot 10^{20}$

Z przedstawionych danych widać, że wzrost temperatury o kilkaset Kelvinów powoduje silny – o kilka rzędów wielkości – wzrost koncentracji nośników prądu.

Drugim czynnikiem, w znacznie mniejszym stopniu wpływającym na **opór elektryczny właściwy**, jest ruchliwość nośników, która zależy przede wszystkim od odstępu czasu między zderzeniami **dryfujących** nośników z drgającymi atomami sieci krystalicznej. W półprzewodnikach samoistnych nośniki tracą energię w wyniku zderzeń z drgającymi atomami sieci krystalicznej, co powoduje spadek ruchliwości przy wzroście temperatury.

Z zależności koncentracji i ruchliwości nośników od temperatury wynika, że **opór elektryczny właściwy** maleje ze wzrostem temperatury praktycznie w całym zakresie temperatur. Przykładowy wykres zależności oporu od temperatury dla elementu półprzewodnikowego pokazuje Rys. 2.



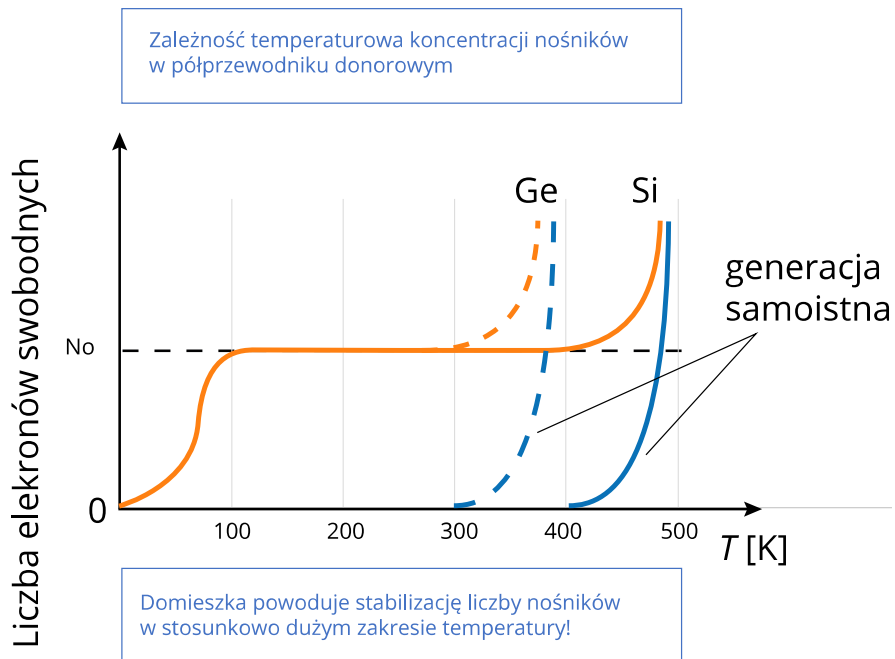
Rys. 2. Wyznaczony doświadczalnie wykres zależności oporu elektrycznego od temperatury dla elementu półprzewodnikowego – termistora typu NTC. Termistory wykorzystuje się jako czujniki temperatury
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Z przedstawionej zależności odczytasz, że przy wzroście temperatury od 290 K = 17°C do 350 K = 77°C opór elektryczny maleje od około 160 Ω do około 20 Ω – przy zmianie temperatury o 60°C opór maleje aż osiem razy.

Półprzewodniki domieszkowe

Kontrolowane domieszkowanie półprzewodników powoduje około milionkrotny wzrost koncentracji jednego rodzaju nośników prądu – nośniki te stają się nośnikami większościowymi i decydują o rodzaju przewodnictwa półprzewodnika. Z tego powodu półprzewodniki domieszkowe dzieli się na dwa typy: półprzewodniki typu n – gdzie dominującymi nośnikami prądu są elektrony i typu p , w których przeważa przewodnictwo dziur.

W półprzewodnikach domieszkowych zależność koncentracji nośników prądu od temperatury przebiega odmiennie niż dla półprzewodników samoistnych i można go podzielić na trzy przedziały (Rys. 3.):

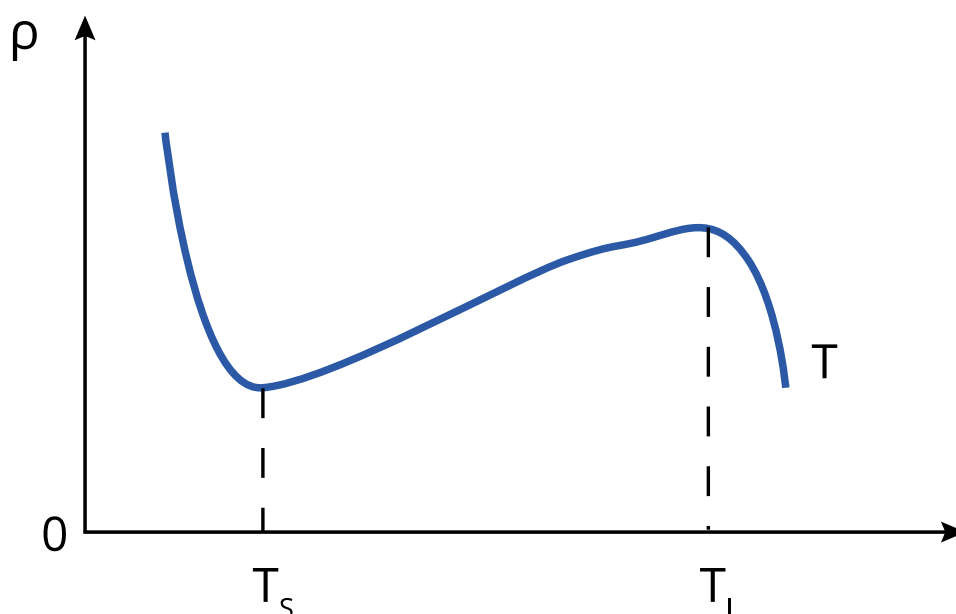


Rys. 3. Zależność koncentracji nośników od temperatury dla półprzewodników domieszkowych typu n
 Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

1. przedział temperatur niskich – do około 100 K, w którym energia drgań termicznych atomów sieci powoduje, że atomy domieszek zaczynają dostarczać właściwych sobie nośników prądu i koncentracja nośników wzrasta;
2. przedział temperatur średnich – od około 100 K do 350-400 K w zależności od materiału, w którym praktycznie wszystkie domieszki oddały swoje nośniki prądu i koncentracja nośników praktycznie się nie zmienia;
3. temperatury wysokie – powyżej 350-400 K, w zakresie których zaczyna wzrastać koncentracja nośników samoistnych – dostarczanych przez atomy pierwiastków macierzystych materiału i ponownie obserwuje się wzrost koncentracji nośników.

Domieszki wpływają również na ruchliwość nośników i poza bardzo niskimi temperaturami – poniżej 100 K, domieszki zmniejszają ruchliwość nośników.

W półprzewodnikach domieszkowych, podobnie jak w samoistnych, większy wpływ na **opór elektryczny właściwy** wywiera koncentracja nośników prądu. Uwzględniając wpływ domieszek na koncentrację i ruchliwość nośników, przebieg zależności **oporu elektrycznego właściwego** od temperatury dla półprzewodników domieszkowych można przedstawić schematycznie jak na Rys. 4.



Rys. 4. Zależności oporu elektrycznego właściwego od temperatury dla półprzewodników domieszkowych. T_s – temperatura, w której wszystkie domieszki uwolniły właściwe sobie nośniki prądu, T_i – temperatura, powyżej której staje się istotny wpływ generowanych nośników samoistnych

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

Przedziały zmian w przebiegu zależności oporu właściwego od temperatury odpowiadają przedziałom zmian w zależności koncentracji nośników od temperatury. Temperatura T_s wynosi około 100 K czyli -173°C , a temperatura T_i około 350–400 K (77°C – 127°C) – w zależności od rodzaju materiału.

W zakresie bardzo niskich temperatur do temperatury T_s , **opór właściwy** maleje ponieważ rośnie liczba nośników dostarczanych przez domieszki – tzw. nośników większościowych. W temperaturze T_s już praktycznie wszystkie atomy domieszek uwolniły właściwe im nośniki prądu i przy dalszym wzroście temperatury ich koncentracja się praktycznie nie zmienia. Dlatego w zakresie temperatur od T_s do T_i ponieważ koncentracja nośników praktycznie się nie zmienia a maleje ich ruchliwość, rośnie **opór elektryczny właściwy** półprzewodników.

Na przykład dla krzemu przy koncentracji domieszek rzędu 10^{16} na centymetr sześcienny **opór elektryczny właściwy** wzrasta od około $0,6 \Omega\text{cm}$ przy temperaturze 100 K, do około $5 \Omega\text{cm}$ przy temperaturze 300 K i do około $8 \Omega\text{cm}$ przy temperaturze 400 K.

Powyżej temperatury T_i zaczyna istotnie wzrastać koncentracja nośników samoistnych i opór elektryczny ponownie zaczyna maleć.

Słowniczek

Opór elektryczny właściwy

(ang.: *specific electrical resistance*) 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. (Słownik fizyki, Prószyński i S-ka 1999).

Dryf elektronów

(ang.: *electron drift*) przemieszczanie się elektronów w sposób uporządkowany pod wpływem zewnętrznego czynnika wymuszającego – np. pola elektrycznego (Encyklopedia szkolna fizyka, wyd. Zielona Sowa 2006).

Natężenie pola elektrycznego

(ang.: *electric field strength*) natężenie pola elektrycznego jest podstawową wielkością opisującą pole elektryczne (i niekiedy samo jest nazywane krótko polem elektrycznym). Jest to wielkość wektorowa zdefiniowana w danym punkcie pola jako stosunek siły, z jaką pole działa na niewielki ładunek dodatni umieszczony w tym punkcie do wartości tego ładunku:

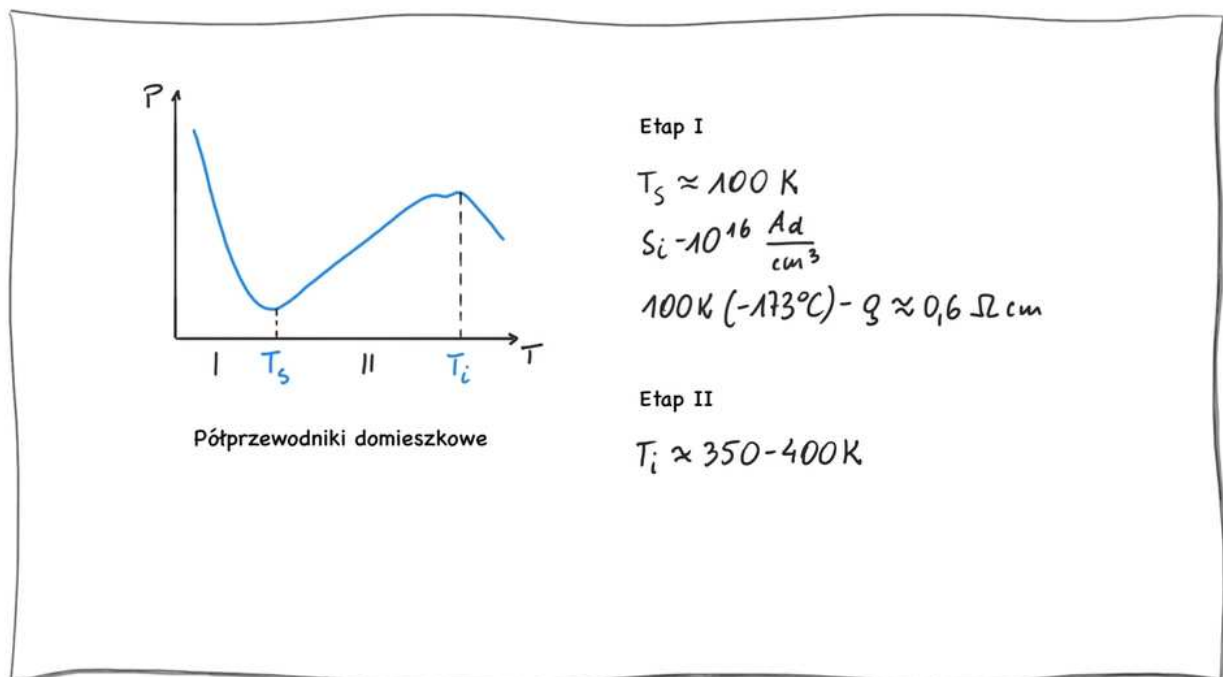
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q}$$

Film samouczek

Czy i dlaczego opór półprzewodników jest zależny od temperatury?

Film pokazuje związek między koncentracją i ruchliwością nośników a oporem elektrycznym właściwym i ich zależności od temperatury.

Trwa wczytywanie danych..



Film dostępny pod adresem </preview/resource/RmEMzGYEeJ385>

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

Wysłuchaj ścieżki lektorskiej nagrania.

Polecenie 1

Uzasadnij stwierdzenie: Opór elektryczny właściwy półprzewodników samoistnych maleje wraz ze wzrostem temperatury.

Polecenie 2

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



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

Ćwiczenie 2

Na podstawie tabeli, uszereguj półprzewodniki od największego do najmniejszego oporu właściwego w temperaturze 300 K.

Koncentracja nośników samoistnych w półprzewodnikach w różnych temperaturach

T[K]	$n_1 \text{ [m}^{-3}\text{]}$		
	Si	Ge	GaAs
200	$6,1 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{16}$	10^6
300	$1,5 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{19}$	10^{13}
500	$9,2 \cdot 10^{19}$	$7,7 \cdot 10^{21}$	$6,1 \cdot 10^{17}$
700	$1,0 \cdot 10^{22}$	$2,7 \cdot 10^{23}$	$1,7 \cdot 10^{20}$

Ćwiczenie 3

Ćwiczenie 4



Ćwiczenie 5



Ćwiczenie 6

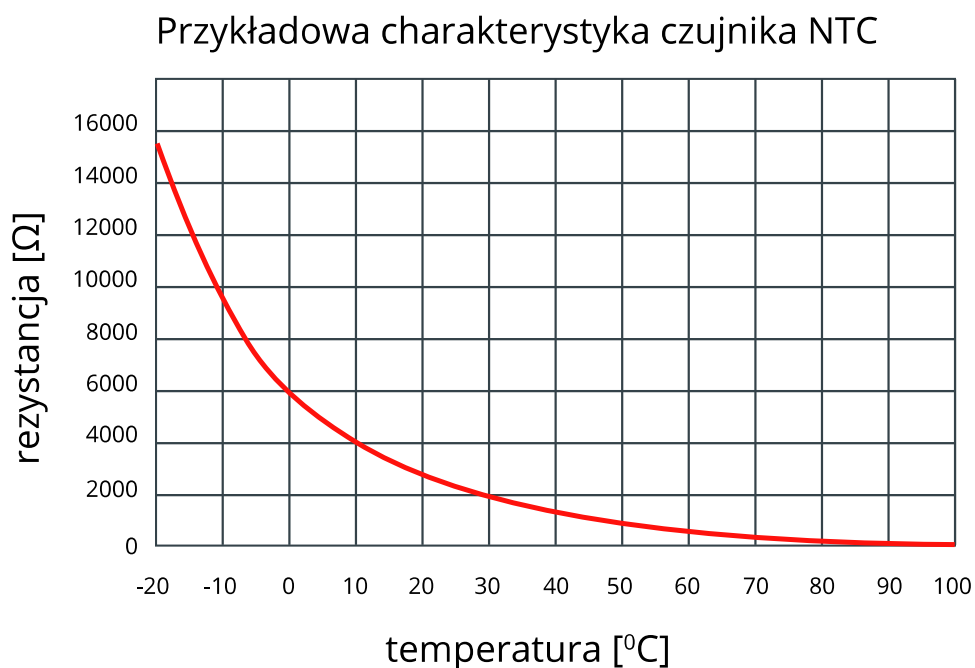


W półprzewodnikach zazwyczaj opór elektryczny właściwy maleje ze wzrostem temperatury. Jednak w półprzewodnikach domieszkowych w typowym zakresie pracy materiałów: -10°C - 60°C opór elektryczny może rosnąć. Dlaczego?

Ćwiczenie 7



W półprzewodnikach samoistnych wzrost temperatury powoduje silny spadek oporu elektrycznego. Ta właściwość jest wykorzystywana w elementach nazywanych termistorami do precyzyjnego pomiaru temperatury. Rysunek przedstawia wykres zależności oporu od temperatury dla typowego termistora.



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

Ćwiczenie 8



Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Wpływ temperatury na opór półprzewodników
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony
Podstawa programowa:	<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: 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.</p> <p>VII. Prąd elektryczny. Uczeń: 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: 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.</p> <p>VIII. Prąd elektryczny . Uczeń: 4) opisuje wpływ temperatury na opór metali i półprzewodników.</p>

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. przedstawi czynniki wpływające na opór elektryczny materiałów i wpływ temperatury na koncentrację i ruchliwość nośników. 2. omówi związek między oporem elektrycznym właściwym a koncentracją i ruchliwością nośników. 3. zastosuje zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań. 4. przeanalizuje i zinterpretuje wykresy zależności koncentracji i ruchliwości nośników od temperatury i oporu właściwego od temperatury.
Strategie nauczania:	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe).
Metody nauczania:	<ul style="list-style-type: none"> - wykład problemowy, - burza mózgów, - pokaz multimedialny.
Formy zajęć:	<ul style="list-style-type: none"> - praca zespołowa, - praca w parach.
Środki dydaktyczne:	Wykresy zależności ruchliwości nośników, koncentracji nośników i oporu elektrycznego właściwego od temperatury. Animacja pokazująca przepływ prądu.
Materiały pomocnicze:	rzutnik multimedialny
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
<p>Nauczyciel zadaje pytania: Co to jest opór elektryczny właściwy? Z czego wynika opór elektryczny materiałów? Oczekiwana odpowiedź: Opór zależy od ilości nośników i od tego, jak często tracą energię uzyskiwaną od zewnętrznego pola.</p>	

Faza realizacyjna:

1. Nauczyciel omawia wielkości fizyczne: koncentracja i ruchliwość nośników i podaje ich związek z oporem elektrycznym właściwym.
2. Nauczyciel przedstawia wykresy zależności koncentracji nośników od temperatury i ruchliwości nośników od temperatury dla półprzewodników samoistnych, zwracając uwagę na silny wzrost koncentracji ze wzrostem temperatury.
3. Na podstawie analizy wykresów uczniowie z pomocą nauczyciela przewidują wpływ temperatury na opór elektryczny właściwy półprzewodników samoistnych.
4. Nauczyciel przedstawia wykres doświadczalny zależności oporu od temperatury dla półprzewodników samoistnych.
5. Powtórzenie czynności 2-4 dla półprzewodników domieszkowych.

Faza podsumowująca:

Uczniowie rozwiązują zadania 2, 3, 4, 6 z zestawu ćwiczeń.

Praca domowa:

Zadania 1, 5, 7, 8 z zestawu ćwiczeń.

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

Multimedium może być wykorzystywane przy powtarzaniu wiadomości i na lekcjach, na których są omawiane właściwości półprzewodników.