Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

MATERIAŁY DYDAKTYCZNE do wykładu z przedmiotu: Materiałoznawstwo elektrotechniczne dla studentów kierunku Elektrotechnika

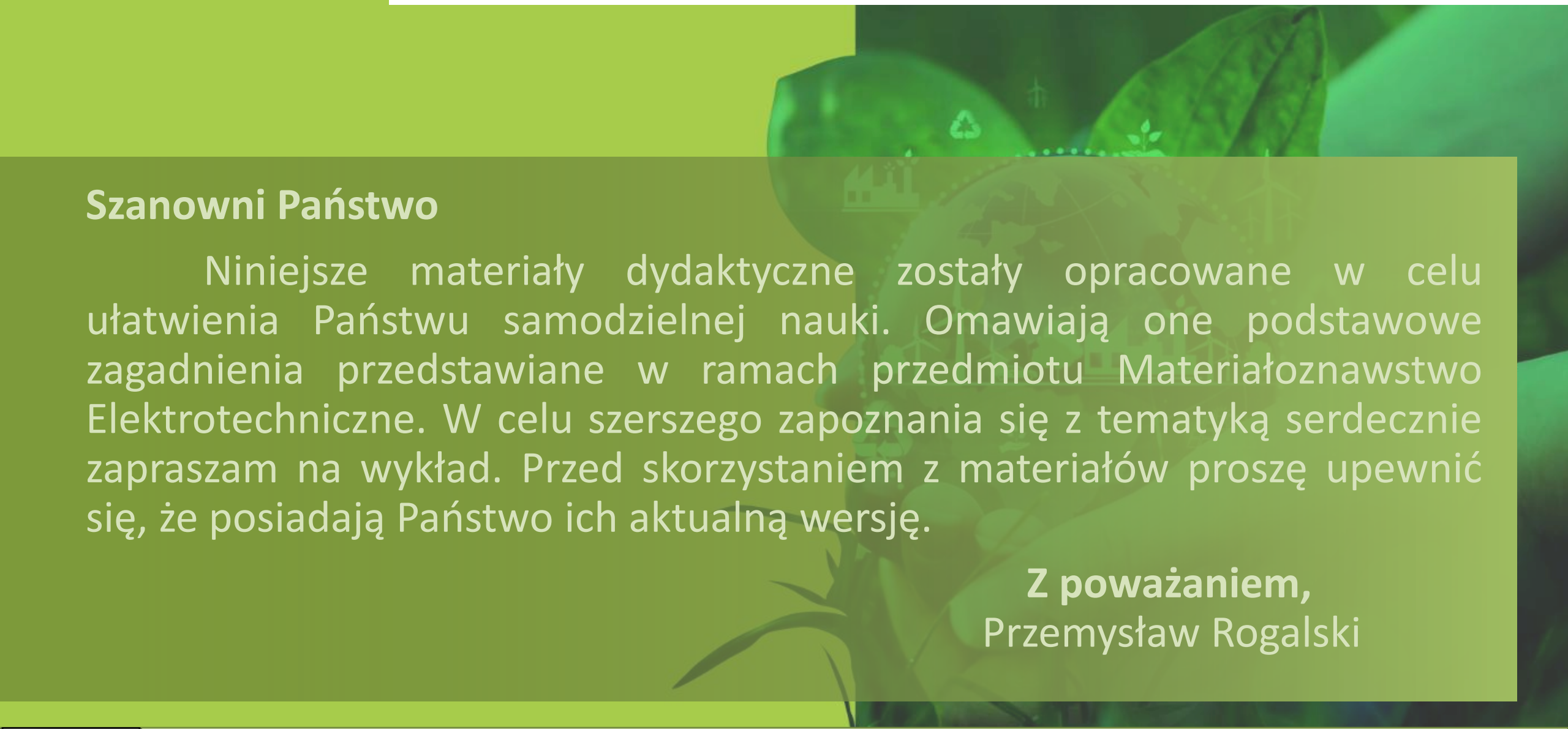
Opracował zespół w składzie:
dr inż. Przemysław Rogalski
dr inż. Konrad Kierczyński

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Szanowni Państwo

Niniejsze materiały dydaktyczne zostały opracowane w celu ułatwienia Państwu samodzielnej nauki. Omawiają one podstawowe zagadnienia przedstawiane w ramach przedmiotu Materiałoznawstwo Elektrotechniczne. W celu szerszego zapoznania się z tematyką serdecznie zapraszam na wykład. Przed skorzystaniem z materiałów proszę upewnić się, że posiadają Państwo ich aktualną wersję.

Z poważaniem,
Przemysław Rogalski

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

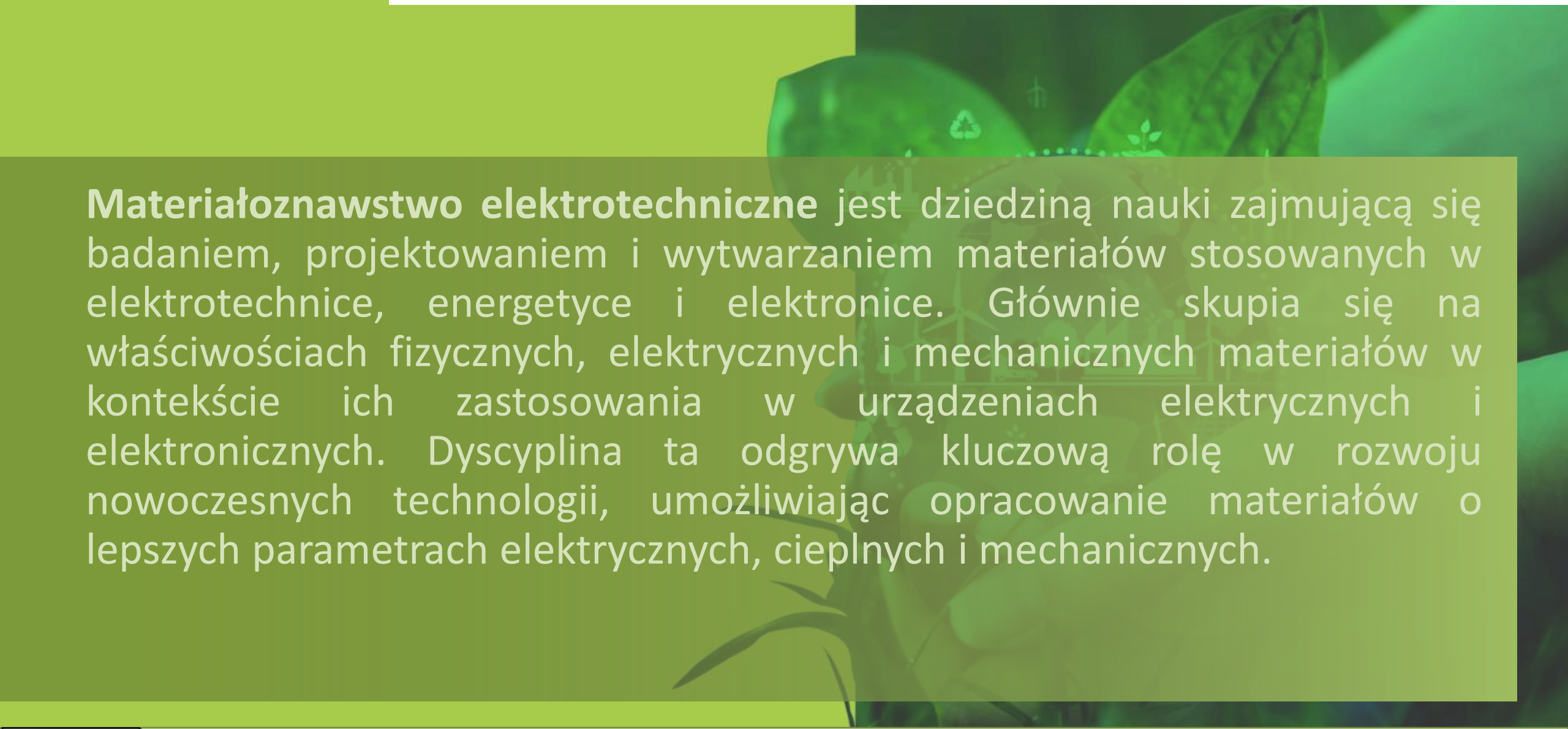
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wstęp.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Materiałoznawstwo elektrotechniczne jest dziedziną nauki zajmującą się badaniem, projektowaniem i wytwarzaniem materiałów stosowanych w elektrotechnice, energetyce i elektronice. Głównie skupia się na właściwościach fizycznych, elektrycznych i mechanicznych materiałów w kontekście ich zastosowania w urządzeniach elektrycznych i elektronicznych. Dyscyplina ta odgrywa kluczową rolę w rozwoju nowoczesnych technologii, umożliwiając opracowanie materiałów o lepszych parametrach elektrycznych, cieplnych i mechanicznych.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Zjawiska elektromagnetyczne opisywane są przez cztery podstawowe równania, nazywane **równaniami Maxwella**. Określają one powstawanie pola elektrycznego i magnetycznego, ich wzajemną relację oraz oddziaływanie na ładunki elektryczne.

1. Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya $$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$
2. Prawo Ampère'a rozszerzone przez Maxwella $$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{j} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}$$
3. Prawo Gaussa dla magnetyzmu $$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

4. Prawo Gaussa dla elektryczności $\nabla \cdot \boldsymbol{D} = q$

Gdzie: $\boldsymbol{E}$- wektor natężenia pola elektrycznego, $\boldsymbol{H}$- wektor natężenia pola magnetycznego, $\boldsymbol{D}$ - wektor indukcji elektrycznej, $\boldsymbol{B}$ - wektor indukcji magnetycznej, $\boldsymbol{j}$ - wektor gęstości prądu elektrycznego, q – ładunek elektryczny,

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya mówi, że zmienne pole magnetyczne powoduje powstawanie zmiennego, wirowego pola elektrycznego. Wynika z niego, że zmiany strumienia magnetycznego prowadzą do indukcji siły elektromotorycznej w zamkniętym obwodzie.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Prawo Ampère'a rozszerzone przez Maxwella mówi, że przepływ prądu elektrycznego oraz zmienne pole elektryczne powodują powstanie wirowego pola magnetycznego.

Prawo Gaussa dla magnetyzmu mówi, że strumień pola magnetycznego przechodzący przez dowolną zamkniętą powierzchnię jest równy zero. Oznacza to, że nie istnieją monopole magnetyczne (np. magnesy jednobiegunowe), a linie pola magnetycznego zawsze tworzą zamknięte pętle.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Prawo Gaussa dla elektryczności mówi, że strumień pola elektrycznego przez zamkniętą powierzchnię jest proporcjonalny do całkowitego ładunku zawartego w tej powierzchni. Oznacza to, że linie pola elektrycznego zaczynają się i kończą na ładunkach elektrycznych.

Pomiędzy wektorem indukcji elektrycznej a wektorem natężenia pola elektrycznego występuje relacja:

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \boldsymbol{E}$$

Gdzie: ε_0 - przenikalność elektryczna próżni, ε_r - względna przenikalność elektryczna ośrodka.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Pomiędzy wektorem indukcji magnetycznej a wektorem natężenia pola magnetycznego występuje relacja:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \mu_r \boldsymbol{H}$$

Gdzie: μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni, μ_0 - względna przenikalność magnetyczna ośrodka,

Gęstość prądu związana jest w natężeniem pola elektrycznego następująco:

$$\boldsymbol{j} = \sigma \boldsymbol{E}$$

Gdzie: σ – konduktywność elektryczna ośrodka.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przenikalność elektryczna próżni ε_0 jest fundamentalną stałą fizyczną, która określa zdolność próżni do przenoszenia pola elektrycznego. Jej wartość wynosi:

$$\varepsilon_0 = 8.854157 \ldots \cdot 10^{-12}\ F/m$$

Względna przenikalność elektryczna $\boldsymbol{\varepsilon_r}$ jest bezwymiarową wielkością, która określa, o ile słabsze będzie pole elektryczne w danym ośrodku w porównaniu do pola elektrycznego wytwarzanego przez taki sam ładunek w próżni. Przyjmuje wartości od 1 (dla próżni) do setek tysięcy (dla ferroelektryków).

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przenikalność magnetyczna próżni μ_0 jest fundamentalną stałą fizyczną, która określa, jak silne pole magnetyczne powstanie w odpowiedzi na przepływ prądu elektrycznego w próżni. Jej wartość to:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ H/m$$

Względna przenikalność magnetyczna μ_r jest bezwymiarową wielkością, która określa, jak dany ośrodek wpływa na pole magnetyczne w porównaniu z próżnią. Może przyjmować wartości mniejsze od 1, osłabiając pole magnetyczne (diamagnetyki), oraz większe od 1, wzmacniając pole magnetyczne (paramagnetyki i ferromagnetyki).

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Konduktywność elektryczna σ , nazywana również przewodnością właściwą, jest wielkością opisującą zdolność materiału do przewodzenia prądu elektrycznego. Określa, jak dobrze materiał przewodzi prąd elektryczny pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Jednostką konduktywności jest simens na metr (S/m).

Konduktywność elektryczna, względna przenikalność elektryczna oraz względna przenikalność magnetyczna są trzema kluczowymi parametrami materiałowymi występującymi w równaniach Maxwella, które opisują zjawiska elektromagnetyczne.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

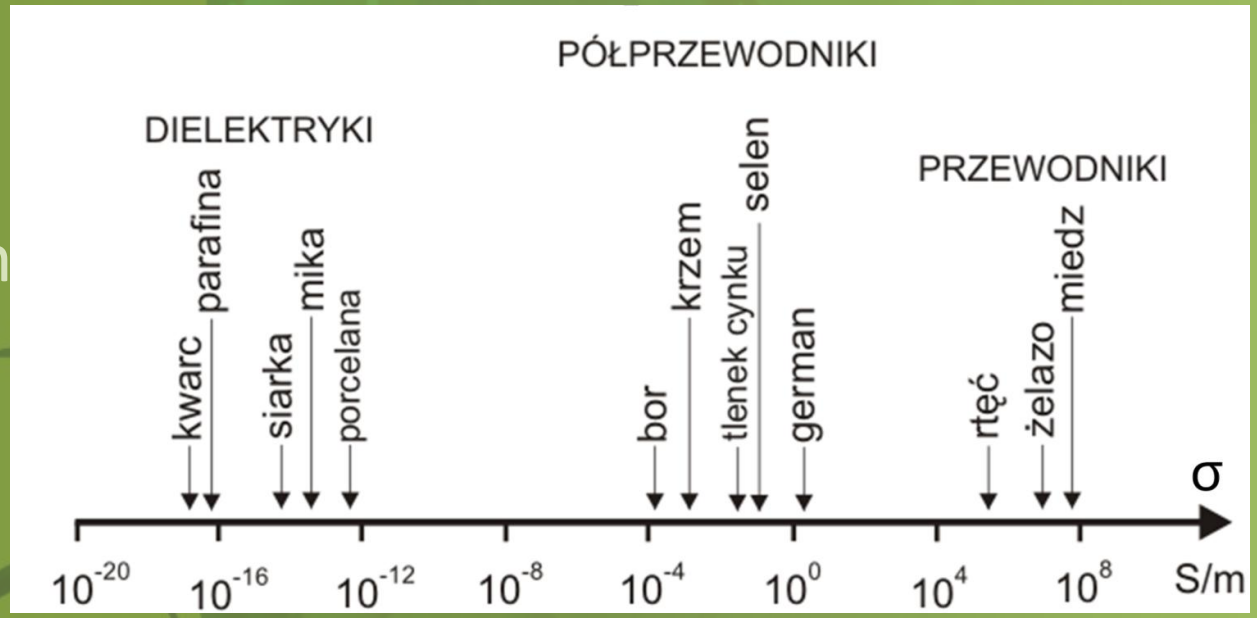
Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Ze względu na wartość konduktywności elektrycznej (σ) materiałów, można je podzielić na trzy główne grupy:

Dielektryki $\sigma < 10^{-6}$ S/m.

Półprzewodniki $\sigma \approx 10^{-6}$- 10^{-4} S/m

Przewodniki $\sigma > 10^{-4}$ S/m



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

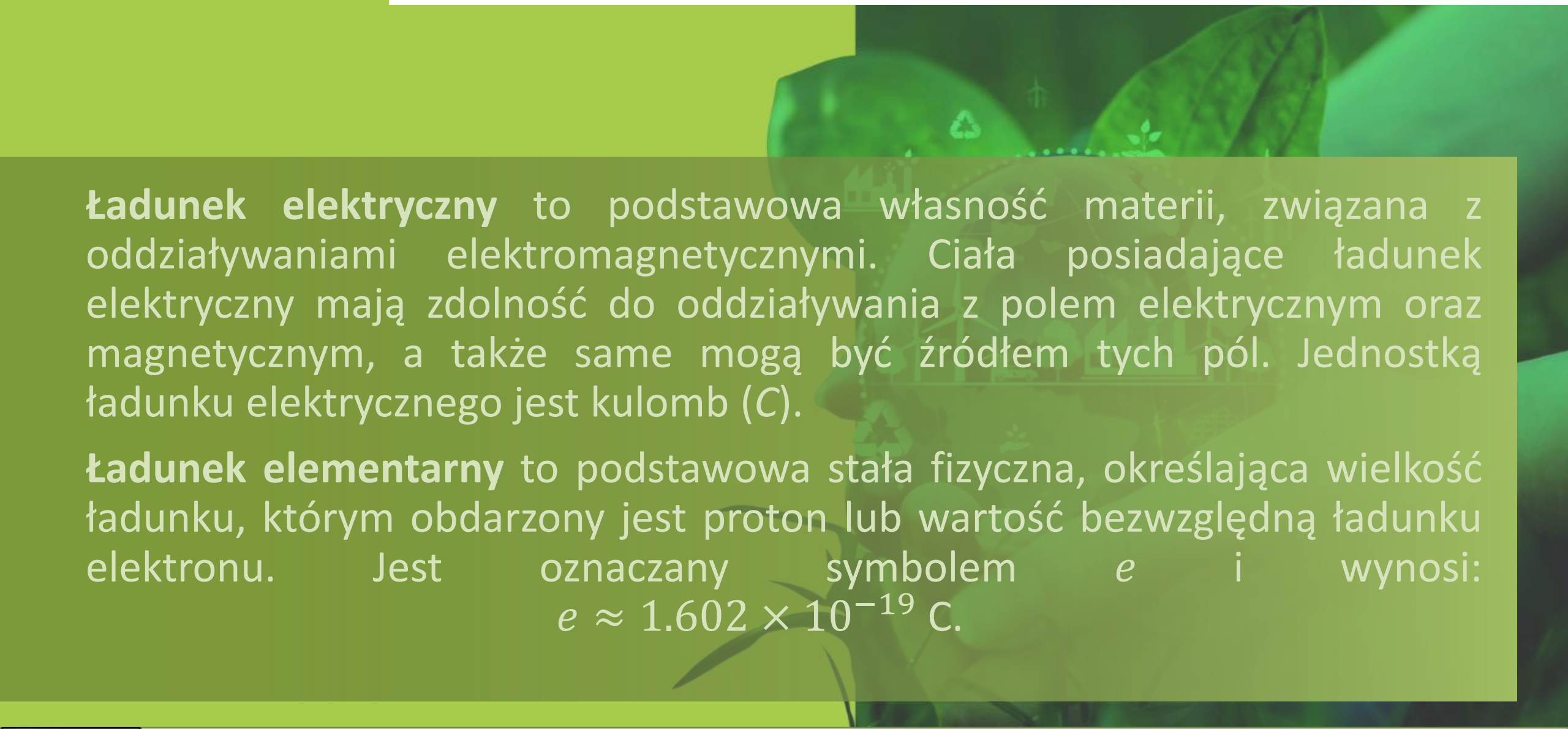
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Podstawowe pojęcia i terminy.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Ładunek elektryczny to podstawowa własność materii, związana z oddziaływaniami elektromagnetycznymi. Ciała posiadające ładunek elektryczny mają zdolność do oddziaływania z polem elektrycznym oraz magnetycznym, a także same mogą być źródłem tych pól. Jednostką ładunku elektrycznego jest kulomb (*C*).

Ładunek elementarny to podstawowa stała fizyczna, określająca wielkość ładunku, którym obdarzony jest proton lub wartość bezwzględną ładunku elektronu. Jest oznaczany symbolem e i wynosi:

$$e \approx 1.602 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}.$$

CC BY

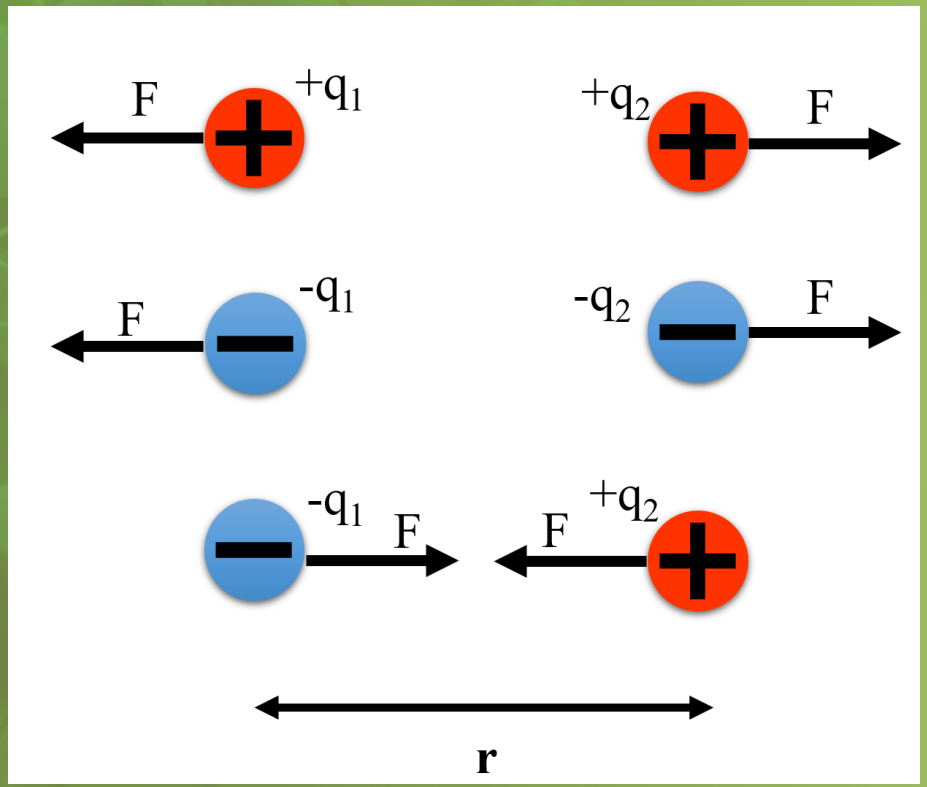
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na dwa ładunki punktowe q_1 i q_2 znajdujące się w przestrzeni działa siła elektrostatyczna F, która jest proporcjonalna do iloczynu wartości tych ładunków oraz odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości r między nimi. Wartość tej siły określa prawo Coulomba:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}, N$$



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Rozważmy sytuację, w której do unieruchomionego ładunku q_1 o wartości 6C zbliżamy ładunek q_2 wartości $2C$ i tym samym znaku. Zgodnie z prawem Coulomba, między ładunkami działa siła odpychająca, skierowana przeciwnie do kierunku ruchu ładunku q_2. Zbliżając ładunek q_2 do ładunku q_1 z nieskończoności na odległość r, musimy wykonać pracę przeciwko sile pola elektrycznego:

$$W = F \cdot r, [J]$$

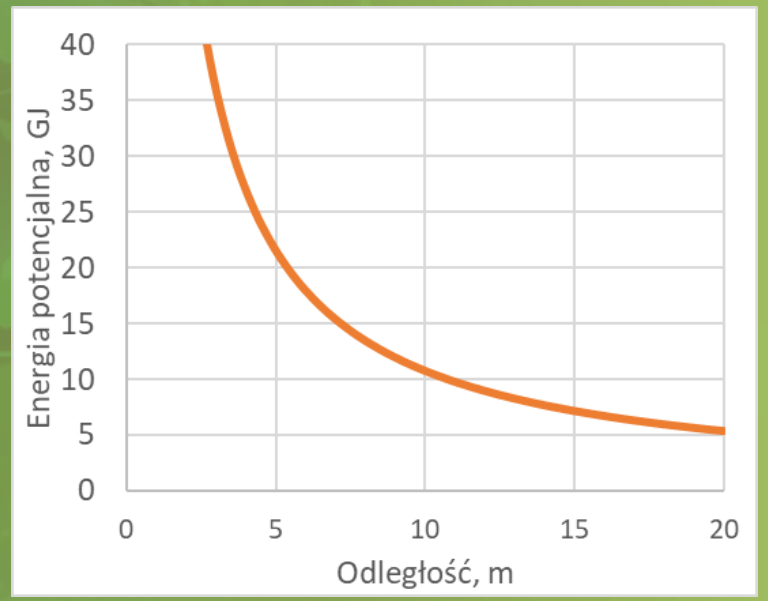
Wydatkowana na przesunięcie ładunku energia zostaje zmagazynowana w postaci energii potencjalnej ładunku w polu elektrycznym. Podobnie jak energia potencjalna zmagazynowana w naciągniętej sprężynie.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W celu opisu pola elektrycznego w danym punkcie stosowane jest pojęcie **potencjału elektrycznego** V_e:

$$V_e = \frac{W}{Q}, \left[\frac{J}{C} = V\right]$$

Wartość potencjału elektrycznego odnosi się do ładunku jednostkowego ($1C$) i nie zależy od wartości konkretnego ładunku, na który działa pole. Jest więc on miarą zdolności pola elektrycznego do wykonania pracy nad jednostkowym ładunkiem.



Energia potencjalna ładunku q_2 w funkcji odległości od q_1.

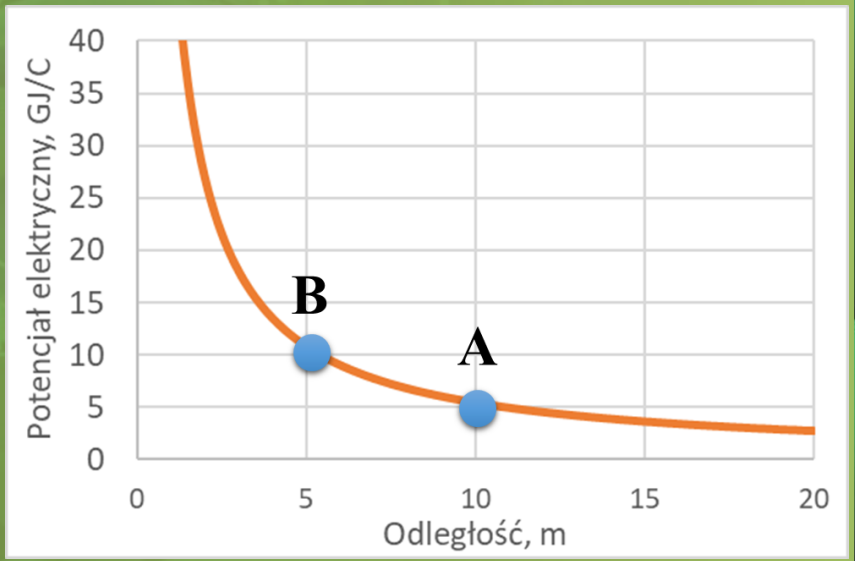
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Napięciem elektrycznym nazywamy różnicę potencjałów pomiędzy dwoma punktami obwodu elektrycznego lub pola elektrycznego. Określa ono pracę potrzebną do przeniesienia ładunku jednostkowego pomiędzy tymi punktami:

$$U = V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q}, [V]$$

$$W_{AB} = (V_B - V_A)q$$



Potencjał elektryczny pola wytworzonego przez ładunki q_1 i q_2.

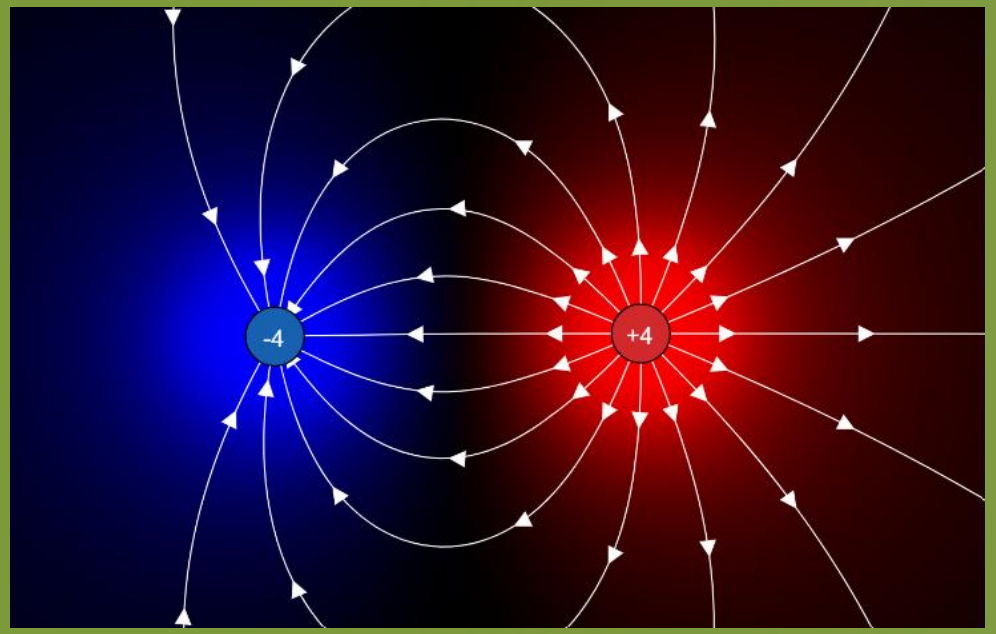
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Pole elektryczne to pole wektorowe, które opisuje wartość i kierunek siły F działającej na jednostkowy, spoczywający ładunek elektryczny q_0 umieszczony w danym punkcie przestrzeni. Do badania właściwości pola elektrycznego stosuje się dodatni **ładunek próbny**, którego rozmiary i wartość ładunku są na tyle małe, aby nie zaburzać istniejącego pola elektrycznego. Idealnie przyjmuje się, że wartość tego ładunku dąży do zera. Wartość **natężenia pola elektrycznego *E*** określamy jako:

$$\boldsymbol{E} = \lim_{q_0 \to 0} \left\{ \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \right\}, [V/m]$$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



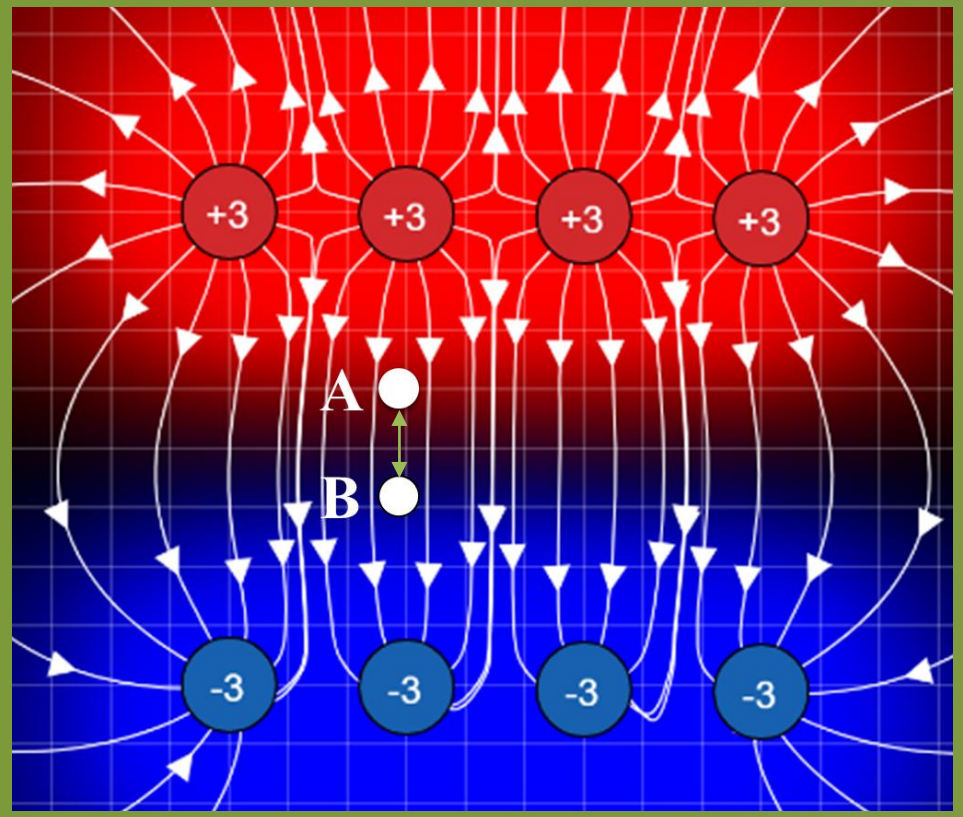
Obraz pola elektrycznego można przedstawić w postaci **linii sił pola elektrycznego**. W obrazowaniu pola elektrycznego przyjęto następujące zasady:

Początek linii sił – na ładunku dodatnim

Koniec linii sił – na ładunku ujemnym

Gęstość linii sił – proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego

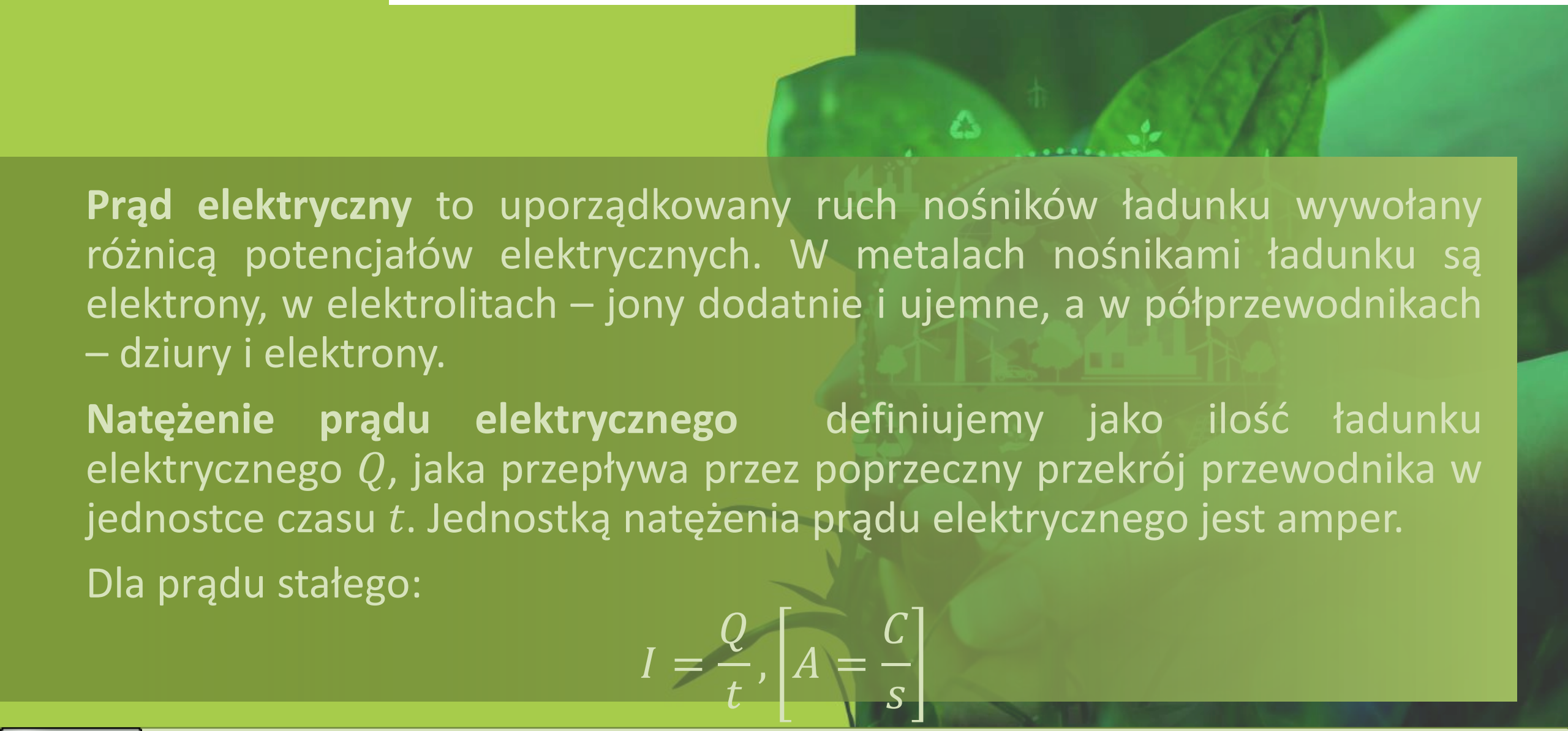
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



W jednorodnym polu elektrycznym natężenie pola elektrycznego między punktami A i B, znajdującymi się w odległości d, możemy określić jako stosunek napięcia elektrycznego między tymi punktami do odległości między nimi:

$$E = \frac{V_B - V_A}{d} = \frac{U_{AB}}{d}, [V/m]$$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Prąd elektryczny to uporządkowany ruch nośników ładunku wywołany różnicą potencjałów elektrycznych. W metalach nośnikami ładunku są elektrony, w elektrolitach – jony dodatnie i ujemne, a w półprzewodnikach – dziury i elektrony.

Natężenie prądu elektrycznego definiujemy jako ilość ładunku elektrycznego Q, jaka przepływa przez poprzeczny przekrój przewodnika w jednostce czasu t. Jednostką natężenia prądu elektrycznego jest amper.

Dla prądu stałego:

$$I = \frac{Q}{t}, \left[A = \frac{C}{s}\right]$$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Dla prądu przemiennego:

$$I = \frac{dQ}{dt}, \left[A = \frac{C}{s}\right]$$

Gęstość prądu elektrycznego definiowana jest jako natężenie prądu na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego przewodnika. Określa ona, jak intensywny jest przepływ prądu w danym punkcie przewodnika.

$$j = \frac{i}{S}, \left[\frac{A}{m^2}\right]$$

Gdzie: i – natężenie prądu, S – pole przekroju poprzecznego przewodnika.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Podstawowym modelem opisującym przewodnictwo prądu elektrycznego w metalach jest **model przewodnictwa Drudego**. Przyjmuje on następujące założenia:

1. Elektrony walencyjne traktowane są jak cząsteczki gazu poruszającego się swobodnie w objętości metalu tworząc tzw. gaz elektronowy.
2. Elektrony w sposób losowy zderzają się z przeszkodami w sieci krystalicznej, którymi mogą być dodatnie jony (węzły sieci), domieszki (zanieczyszczenia) w postaci innych atomów lub zaburzenia (odkształcenia) sieci powstałe np. podczas obróbki metalu.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

3. Elektrony zachowują się jak cząstki w ujęciu fizyki klasycznej. Przyjmuje się że mają masę *m* na którą działa siła Lorentza w polu elektrycznym.

Po przyłożeniu do metalu zewnętrznego pola elektrycznego *E* na elektrony o ładunku *q* w nim znajdujące się zaczyna działać siła F zgodnie z równaniem:

$$F = qE, [N]$$

Zgodnie z drugim prawem Newtona, stała działająca na ciało siła powoduje, że to porusza się ruchem jednostajnie przyśpieszonym. Elektron przyśpiesza do momentu napotkania przeszkody. W zderzeniu przekazuje sieci

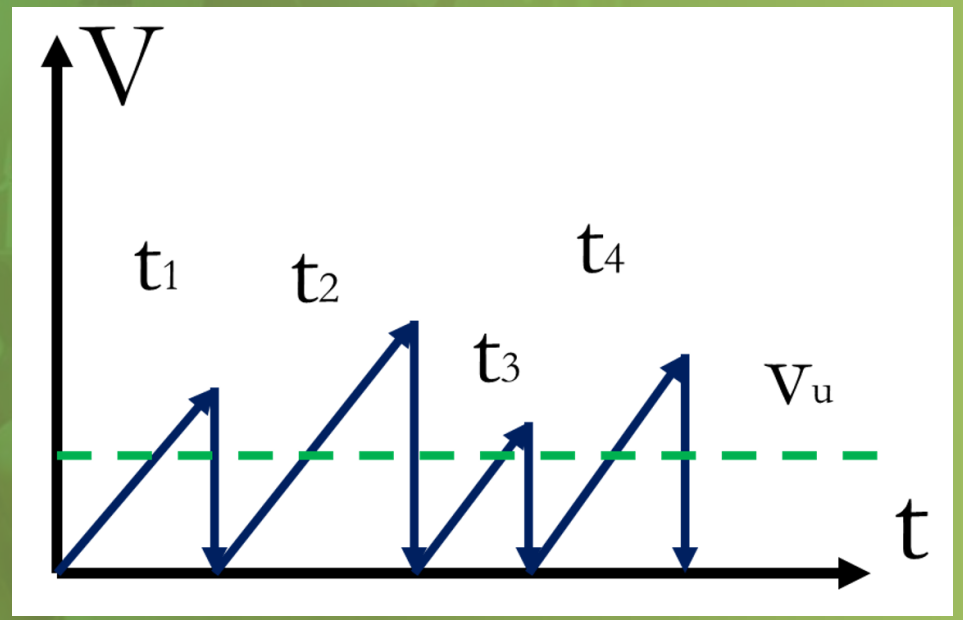
CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

krystalicznej zdobytą od pola elektrycznego energię zatrzymując się. Następnie elektron ponownie zaczyna poruszać się ruchem jednostajnie przyśpieszonym do kolejnego zderzenia.

Prędkością unoszenia v_u nazywamy średnią prędkość elektronów przyśpieszanych polem elektrycznym o natężeniu E.

Czasem relaksacji τ nazywamy średni czas



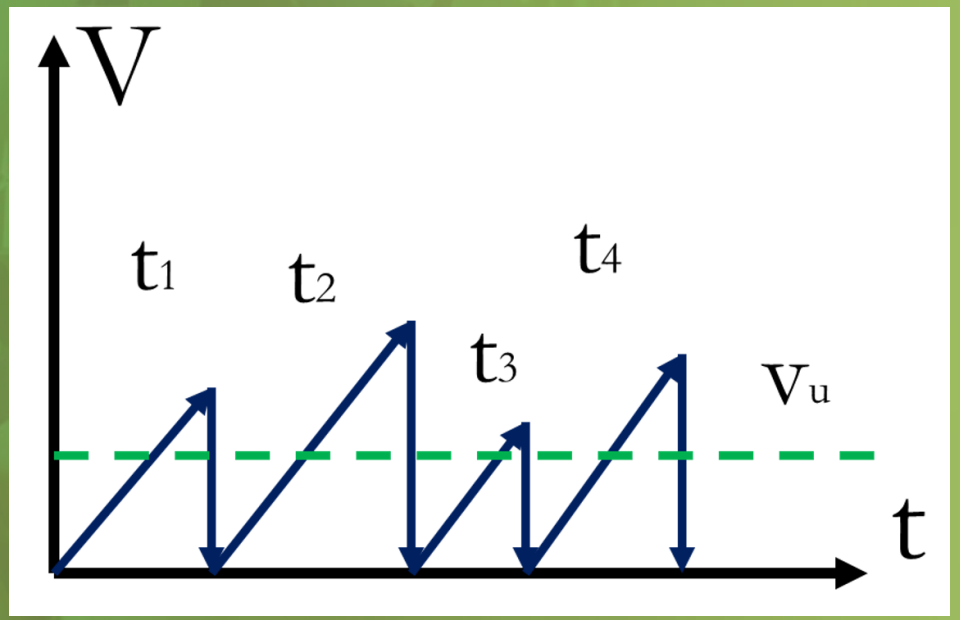
CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

pomiędzy dwom kolejnymi zderzeniami elektronu z jonami, domieszkami bądź deformacjami sieci krystalicznej. Wiedząc, że $F = ma$, oraz $F = eE$ możemy określić relację pomiędzy prędkością unoszenia a czasem relaksacji:

$$v_u = a\tau = \frac{e}{m_e}E$$

Gdzie: m_e - masa elektronu, e – ładunek elektronu



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Znając prędkość unoszenia v_u oraz koncentrację nośników w materiale n, będącą liczbą nośników (dla metali elektronów) na jednostkę objętości można określić wartość gęstości prądu płynącego w metalu:

$$j = env_u$$

Uwzględniając relację pomiędzy prędkością unoszenia a czasem relaksacji otrzymujemy:

$$j = \frac{e^2 n\tau}{m_e} E$$

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Czynniki wchodzące do ułamka w poprzednim równaniu są ściśle związane z właściwościami materiału, przez który przepływa prąd elektryczny. Definiowane są one jako konduktywność (przewodność właściwa) σ:

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m_e}, \left[\frac{S}{m} = \frac{1}{\Omega m}\right]$$

Odwrotnością konduktywności jest rezystywność (opór właściwy) ρ:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{e^2 n \tau}, [\Omega m]$$

Ostatecznie uzyskujemy: $j = \sigma E = \frac{E}{\rho}$

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Prawo Ohma zostało przedstawione w znanej nam formie w 1826 roku przez Georga Simona Ohma. Prawo to mówi, że jeśli rezystancja jest stała, to natężenie płynącego prądu jest wprost proporcjonalne do przyłożonego napięcia. Matematycznie wyraża się wzorem.

$$U = IR$$

Współczynnik proporcjonalności pomiędzy przyłożonym napięciem a natężeniem prądu nazywamy rezystancją statyczną i określamy jako:

$$R = \frac{U}{I}, [\Omega]$$

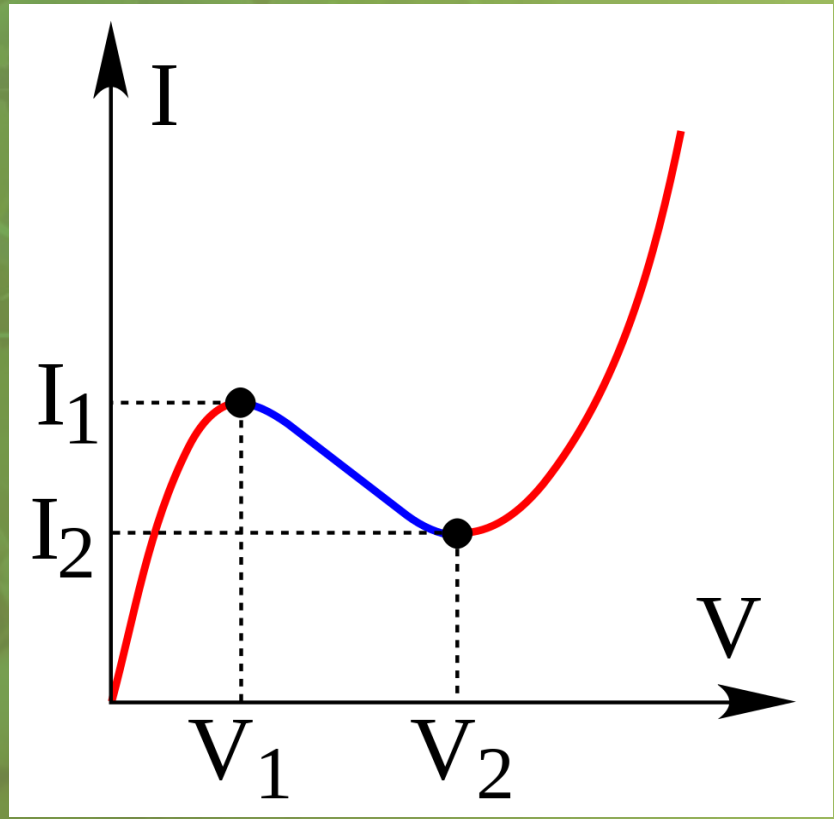
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W przypadku, gdy rezystancja zmienia się w funkcji napięcia bądź natężenia prądu, nie można korzystać z prawa Ohma dla rezystancji statycznej. W takich sytuacjach stosuje się pojęcie **rezystancji dynamicznej** *r*:

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}, [\Omega]$$

Rezystancja dynamiczna może przyjmować wartości ujemne.



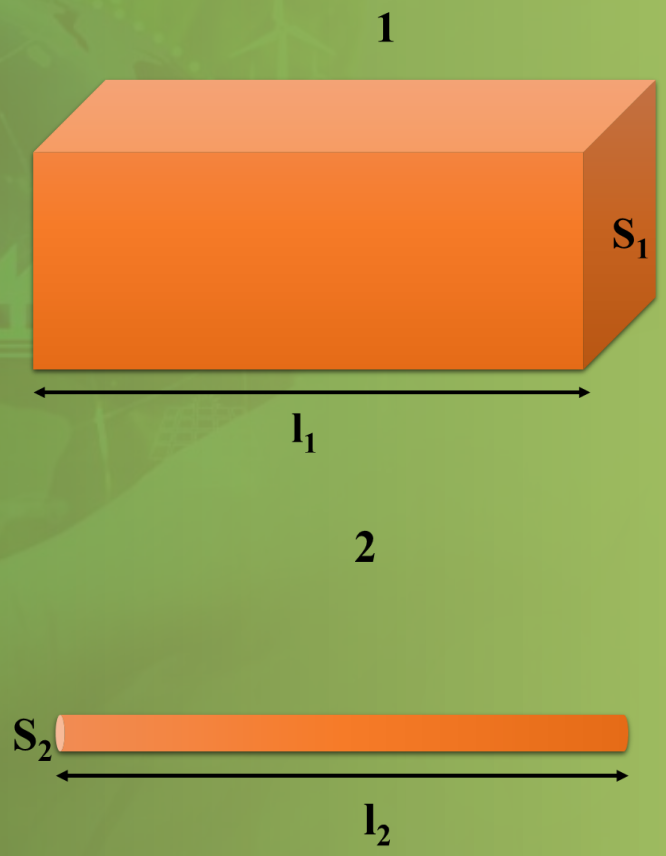
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Rezystywność ρ jest cechą materiałową (jak np. kolor, chropowatość), charakteryzującą materiał pod względem przewodnictwa elektrycznego i nie jest zależna od wymiarów geometrycznych.

Rezystancja *R* określa stosunek spadku napięcia do natężenia prądu płynącego przez materiał o konkretnych wymiarach geometrycznych.

$$R_1 < R_2 \qquad \rho_1 = \rho_2$$

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{l}{\sigma S}$$



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wraz ze wzrostem temperatury nasilają się drgania sieci krystalicznej metalu, czego skutkiem jest zmniejszenie prędkości unoszenia i skrócenie czasu relaksacji. Powoduje to wzrost rezystywności metalu w funkcji temperatury. Z doświadczeń wynika, że rezystywność większości metali wykazuje liniową zależność od temperatury. W pobliżu temperatury pokojowej zależność tę można przedstawić wzorem:

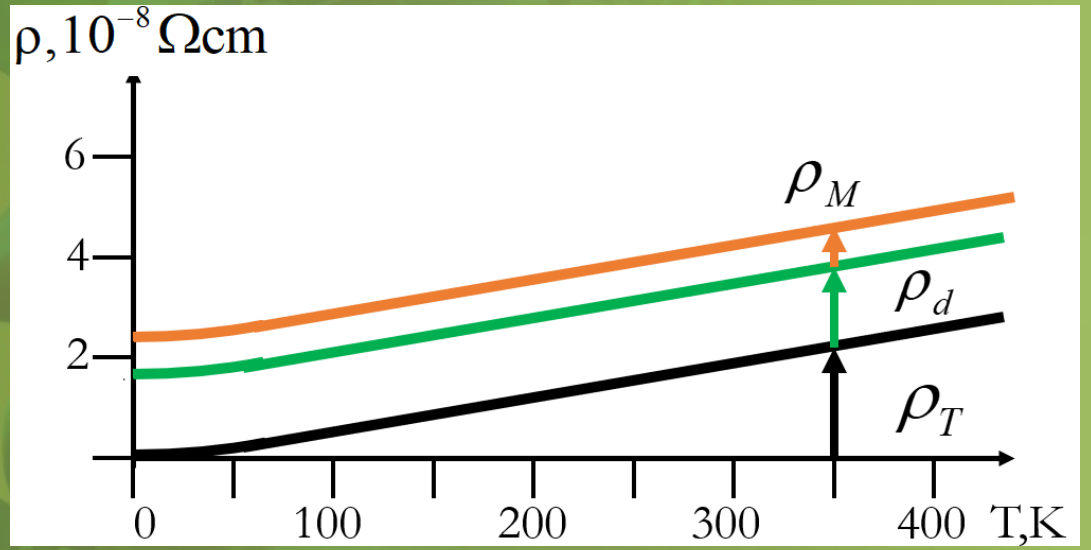
$$\rho_T = \rho_{293K}\big(1 + \alpha(T - 293)\big)$$

Gdzie: α – temperaturowy współczynnik rezystywności, ρ_{293K}, ρ_T - rezystywności danego metalu przy temperaturze odniesienia 293 K oraz przy temperaturze *T*

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Ostatecznie rezystywność metali zależy od temperatury T, czystości metalu (zawartości zanieczyszczeń) N_D oraz od zawartości odkształceń mechanicznych N_M powstających podczas produkcji przewodów, szyn, żył kabli i innych wyrobów.

$$\rho = \rho(T) + \rho(N_D) + \rho(N_M)$$



Czynniki wpływające na temperaturową zależność rezystywności metali

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Własności elektryczne niektórych chemicznie czystych metali (t = 20°C)

Metal	Rezystywność (Ωm)	Konduktywność (S/m)	Współczynnik α (1/K)
Miedź	$1{,}68\times10^{-8}$	$5{,}96\times10^{7}$	$3{,}93\times10^{-3}$
Aluminium	$2{,}82\times10^{-8}$	$3{,}50\times10^{7}$	$3{,}90\times10^{-3}$
Srebro	$1{,}59\times10^{-8}$	$6{,}30\times10^{7}$	$3{,}80\times10^{-3}$
Złoto	$2{,}44\times10^{-8}$	$4{,}10\times10^{7}$	$3{,}40\times10^{-3}$
Nikiel	$6{,}99\times10^{-8}$	$1{,}43\times10^{7}$	$\approx6{,}0\times10^{-3}$
Wolfram	$5{,}60\times10^{-8}$	$1{,}79\times10^{7}$	$\approx4{,}5\times10^{-3}$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

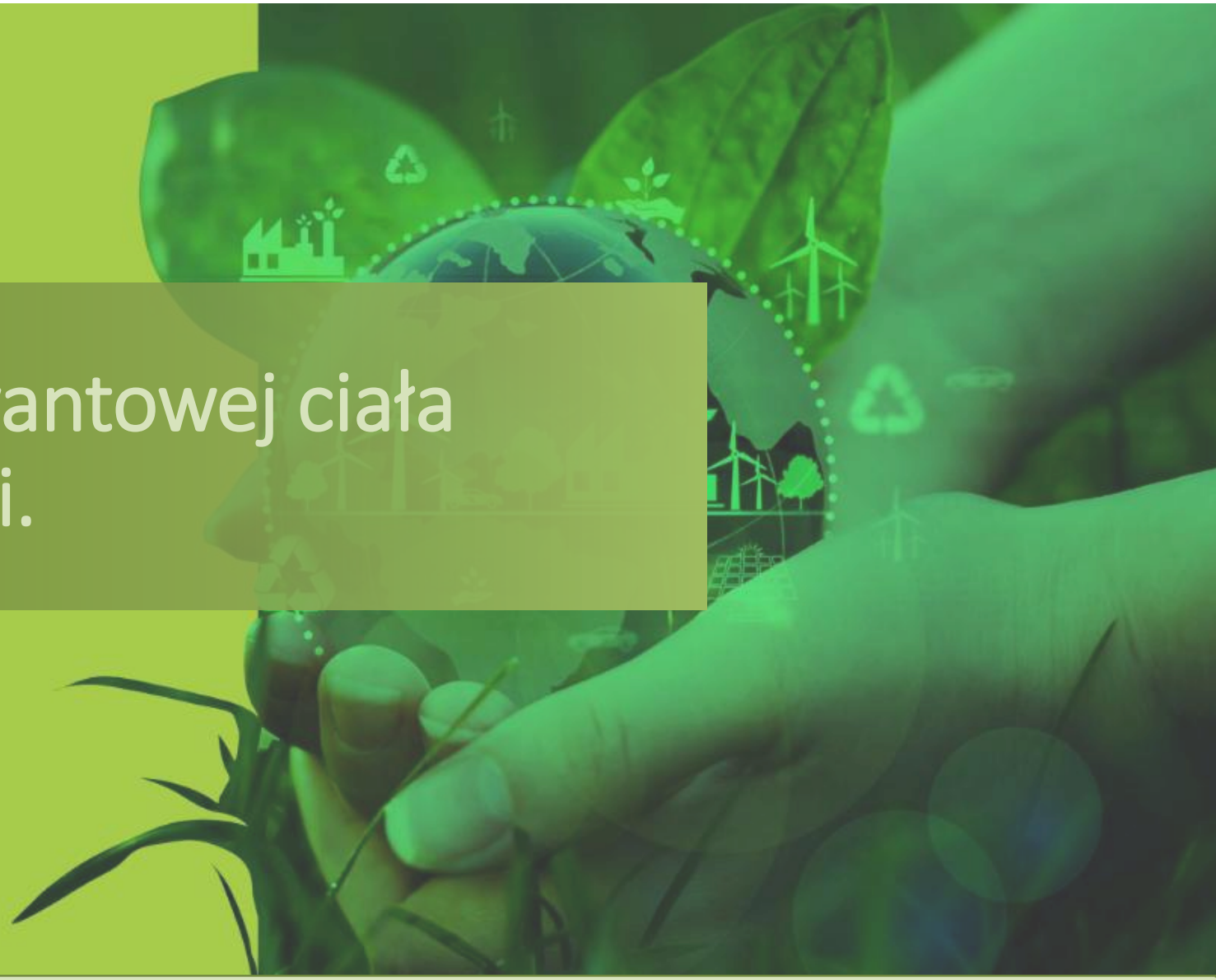
Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Podstawy mechaniki kwantowej ciała stałego. Budowa materii.



CC BY

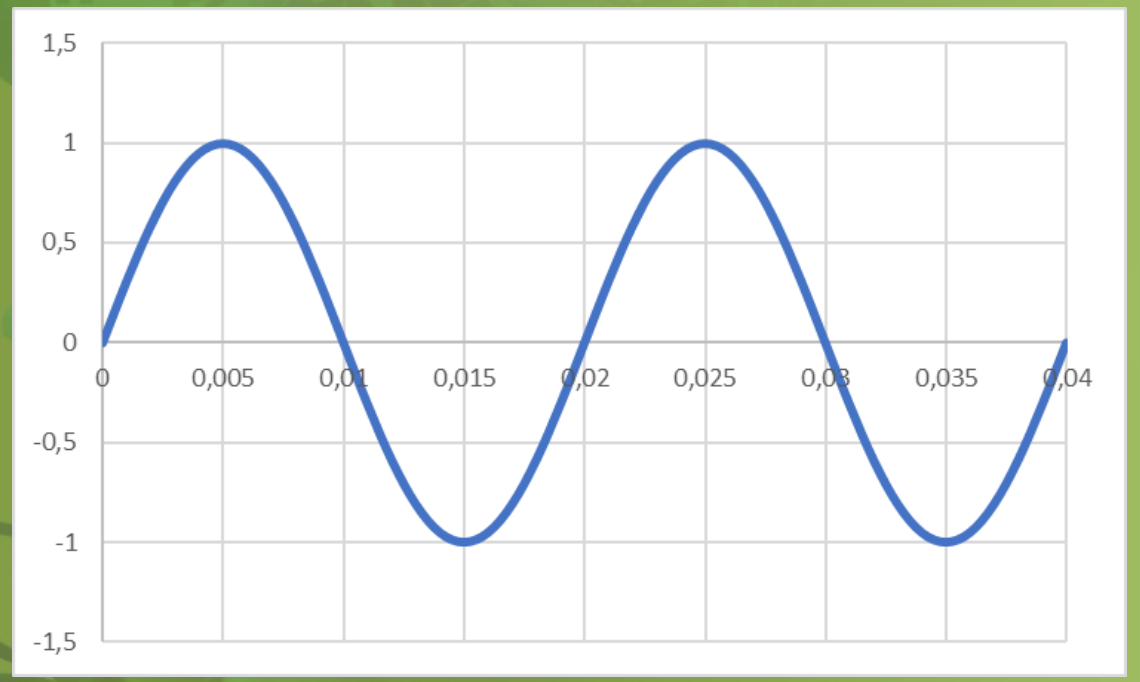
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Okres *T*, [s] – czas potrzebny do wykonania jednego pełnego ruchu drgającego

Częstotliwość *f*, [Hz] – liczba cykli (okresów) zjawiska na sekundę.

Długość fali *λ*, [m] – najmniejsza odległość pomiędzy dwoma powtarzającymi się fragmentami fali



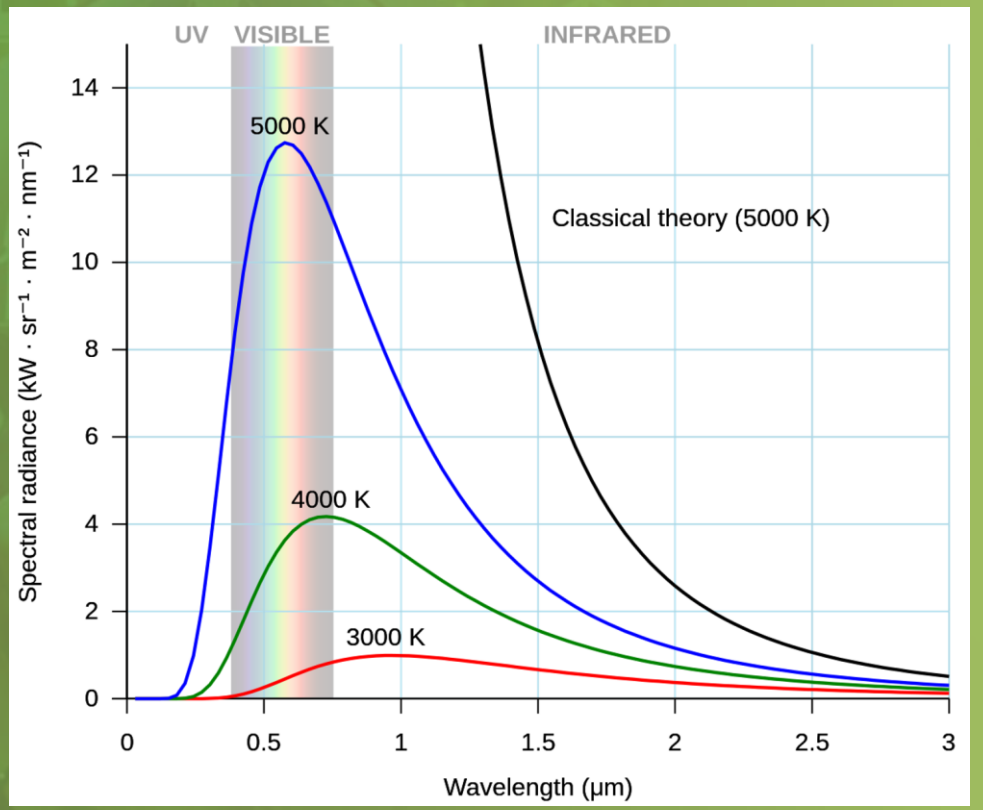
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W drugiej połowie XIX wieku uważano, że fizyka została już w pełni poznana i odkryta. Sądzono, że pozostały jedynie nieliczne „zagadki", które nie zostały jeszcze rozwiązane. Jedną z nich było opisanie widma promieniowania ciała doskonale czarnego. Każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego (0 K) emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Ciało doskonale czarne jest obiektem, który pochłania całe padające na nie promieniowanie. Wynika z tego, że promieniuje ono wyłącznie w zależności od swojej własnej temperatury. Tymczasem przewidywania klasycznej teorii dla widma promieniowania ciała doskonale czarnego w znacznym stopniu odbiegały od wyników doświadczalnych.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Problem ten nazwano katastrofą w nadfiolecie (czarna krzywa na rysunku). Rozwiązał go w 1900 roku Max Planck, tworząc równanie opisujące widmo promieniowania ciała doskonale czarnego w funkcji jego temperatury (krzywa niebieska, zielona i czerwona na rysunku). Na podstawie porównania swojej formuły z wynikami doświadczalnymi określił stałe fizyczne wchodzące do równania.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Równanie zdolności emisyjnej ciała R_λ doskonale czarnego:

$$R_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

Gdzie c_1 i c_2 są określane doświadczalnie, λ – długość fali, T – temperatura

Dodatkowo w myśl teorii Plancka promieniowanie emitowane jest jedynie w postaci kwantów (porcji) energii:

$$E_1 = h\nu$$

Gdzie: h - stała Plancka, ν – częstotliwość fali

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

$$h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} \left[\frac{kg \cdot m^2}{s} = J \cdot s\right]$$

Ponadto może być wyemitowana jedynie całkowita liczba kwantów:

$$E_n = nhv, \rightarrow n = 1,2,3,\ldots$$

W roku 1918 Max Planck za odkrycie kwantów energii uzyskał Nagrodę Nobla.

Na bazie planetarnego modelu atomu autorstwa Ernesta Rutherforda (laureata Nagrody Nobla w 1908 roku) Niels Bohr w 1912 roku skonstruował własny opis atomu wodoru. W jego ujęciu obowiązują dwa

CC BY

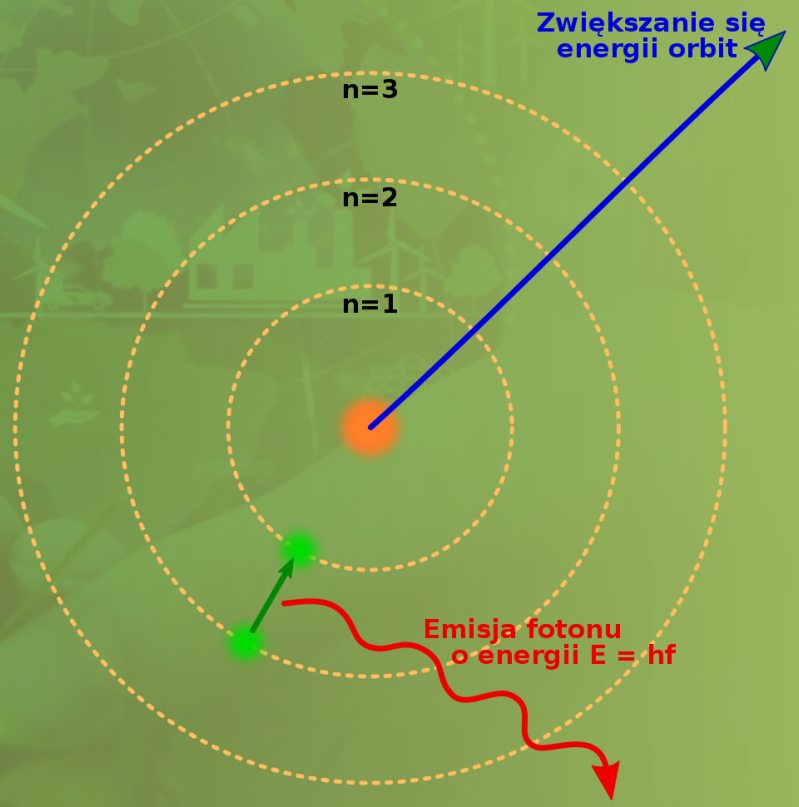
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

kluczowe postulaty:

1.Elektron może poruszać się tylko po ściśle określonych orbitach (tzw. stacjonarnych), zachowując przy tym stałą wartość energii.

2.Przy przeskoku z jednej orbity stacjonarnej na inną, elektron emituje bądź pochłania kwant energii:

$$h\nu = E_k - E_j,$$



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

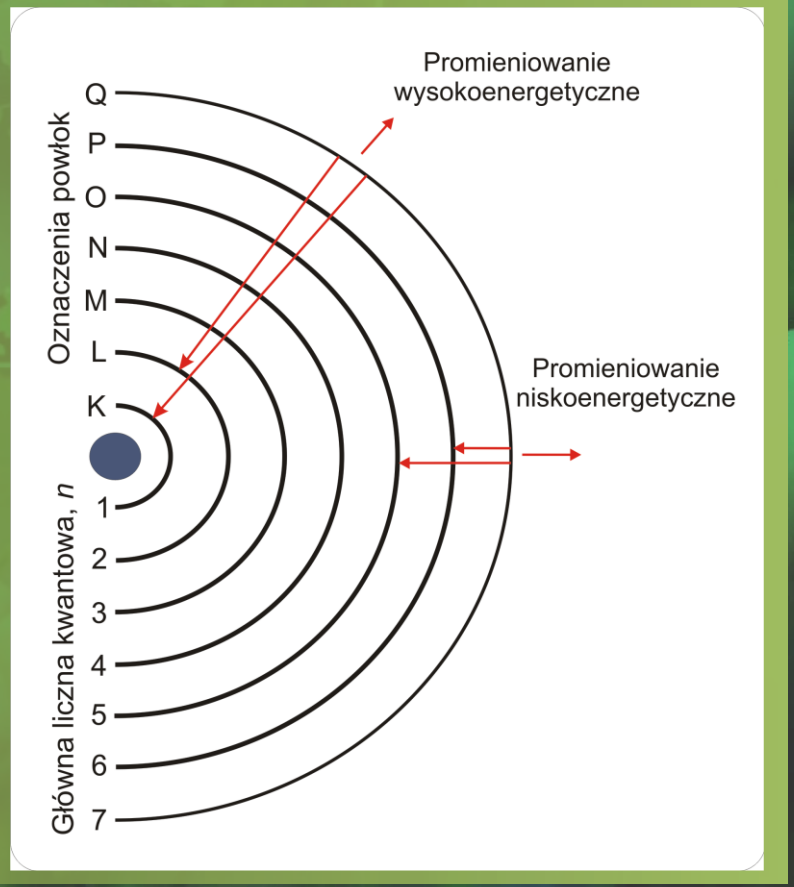
Ze względu na bardzo niewielkie wartości energii kwantów w mechanice kwantowej powszechnie używa się jednostki zwanej **1 elektronowoltem**. Jest to dokładnie ta porcja energii, jaką zyskuje elektron podczas pokonania różnicy potencjałów wynoszącej **1 wolta**.

$$1eV = e \cdot 1V = 1{,}6 \cdot 10^{-19} J$$

Stan kwantowy elektronu w atomie opisany jest przez cztery liczby kwantowe, które pozwalają w pełni scharakteryzować stan elektronu w atomie. W mechanice kwantowej wyróżnia się cztery podstawowe liczby kwantowe: główną, orbitalną (poboczną), magnetyczną oraz spinową.

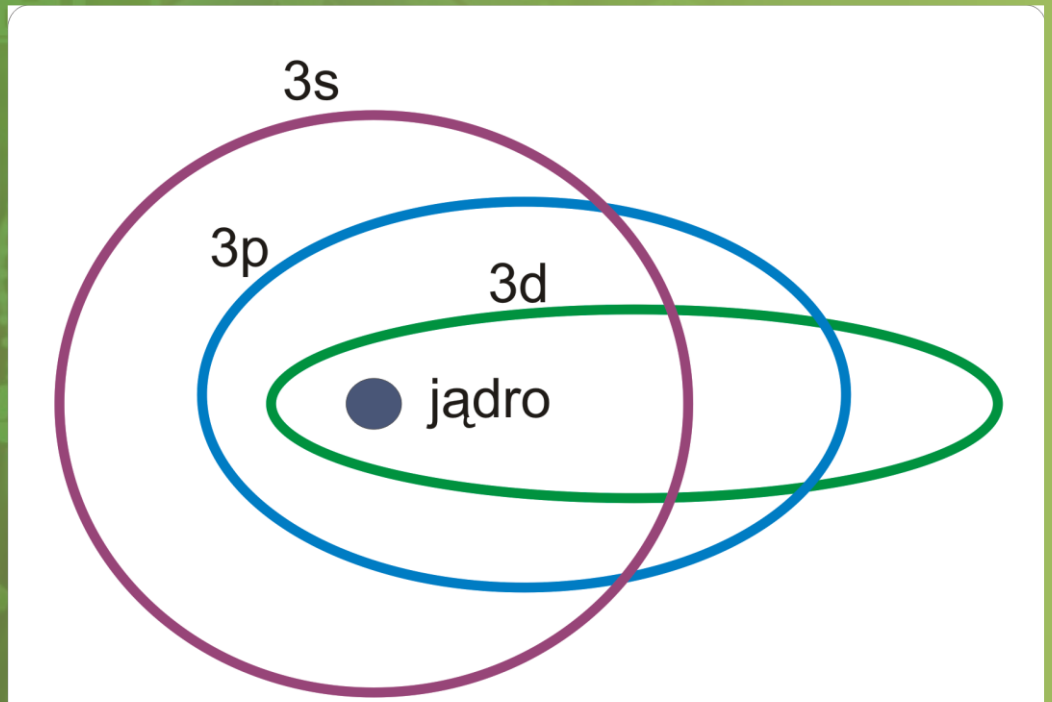
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

n - główna liczba kwantowa - numer porządkowy powłoki (1, 2, 3 … n), na której znajduje się elektron, powłoki oznaczamy literami K, L, M, N, O, P, Q



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

l - orbitalna liczba kwantowa - ilość warstw (podpowłok) w powłoce. Na danej powłoce może istnieć n (główna liczba kwantowa) podpowłok numerowanych od 0 do (1-n). Oznaczane są kolejnymi literami s, p, d, f, …, Orbity należące do podpowłok s, mają kształt kołowy, kolejne są coraz bardziej spłaszczonymi elipsami.

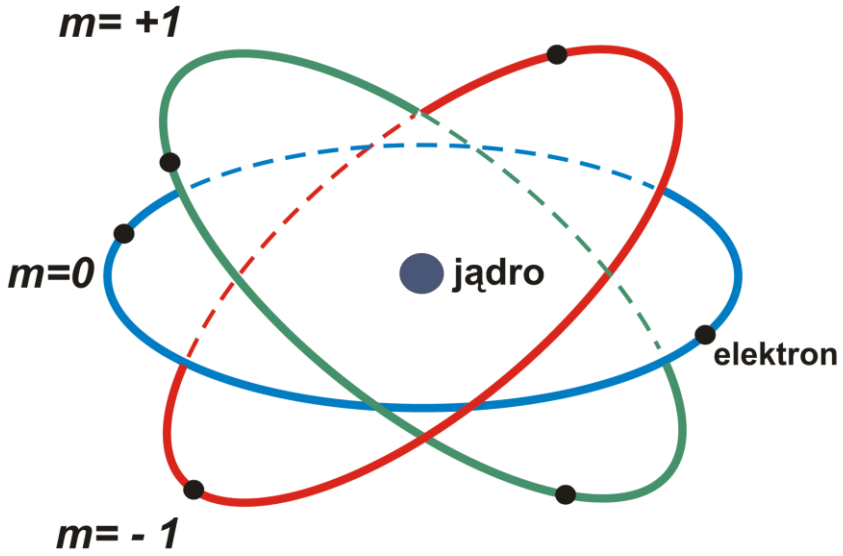


Warstwy w powłoce M, (n=3)

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

m - magnetyczna liczba kwantowa - określa orientację przestrzenną orbity. Płaszczyzny orbit należących do poszczególnych warstw (podpowłok) przyjmują ściśle określone kąty. Liczba kątów to (2/+1 - pamiętając, że l liczymy od 0), a wartości przyjmuje od -/ do +/

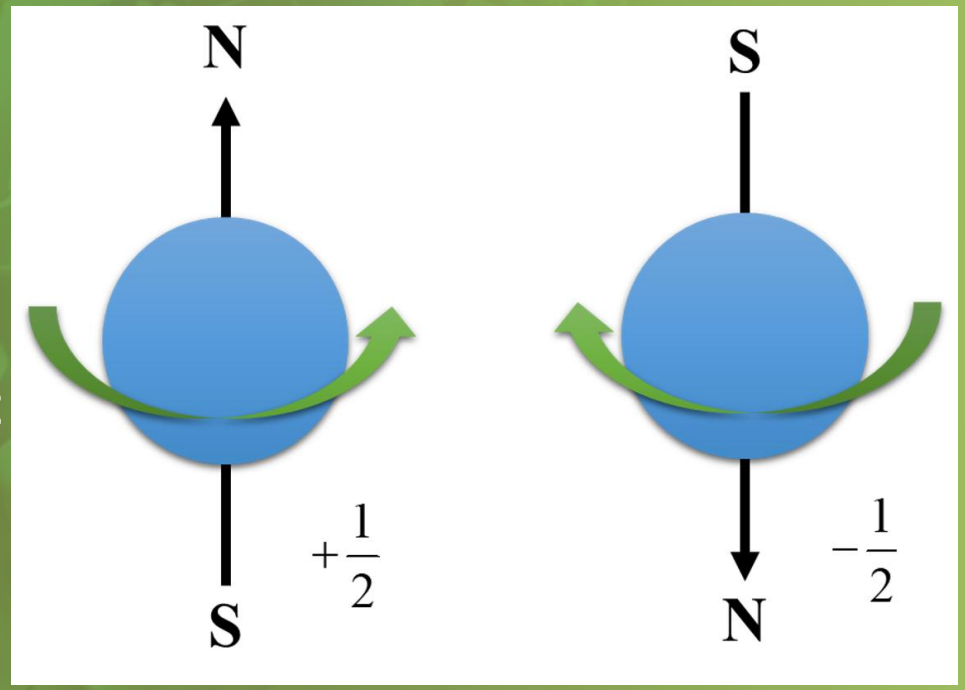


Ustawienie przestrzenne orbit w warstwie 3p

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

s - spinowa liczba kwantowa - może przyjąć dwie wartości, -1/2 i 1/2. Określa własny moment pędu elektronu (spin) oraz jego możliwe orientacje w przestrzeni względem zewnętrznego pola magnetycznego.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Największy wpływ na wartość energii elektronu w atomie ma główna liczba kwantowa n, mniejszy – liczba orbitalna l, jeszcze mniejszy – liczba magnetyczna m a najmniejszy– spin elektronu s. Możemy zapisać:

$$E(n)\rangle E(l)\rangle E(m)\rangle E(s)$$

Zasada Pauliego - w danym stanie kwantowym, określanym czterema liczbami kwantowymi n, l, m, s może znajdować się nie więcej niż jeden elektron, a jego energia jest funkcją tych liczb kwantowych:

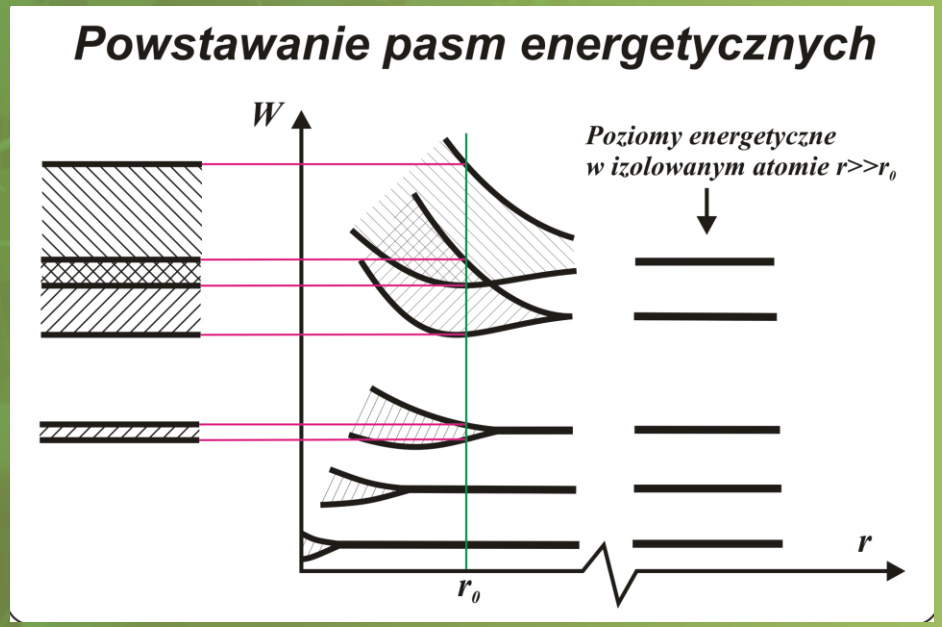
$$E(n,l,m,s) = f(n,l,m,s)$$

W roku 1944 Wolfgang Pauli uzyskał za to odkrycie Nagrodę Nobla.

CC BY

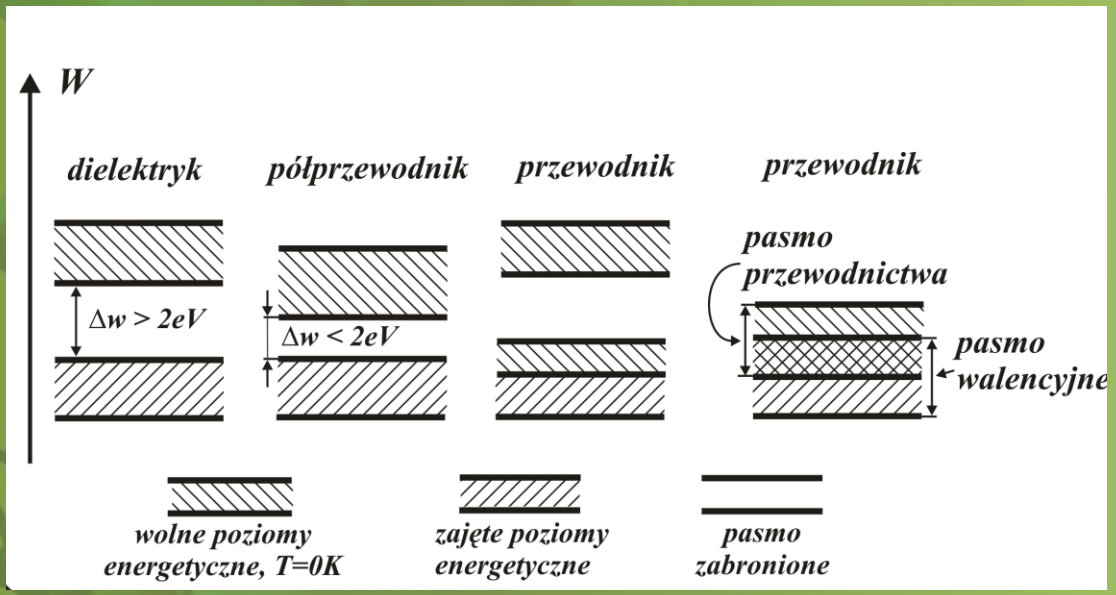
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Po połączeniu N atomów w ciało stałe, zgodnie z Zasadą Pauliego, tylko jeden elektron, o danej konfiguracji, może posiadać daną wartość energii. Elektron pochodzący od każdego następnego atomu ma energię nieznacznie inną (mniejszą lub większą) niż elektron poprzedni. W ten sposób w ciele stałym z pojedynczego stanu energetycznego atomu powstaje N stanów energetycznych, umieszczonych bardzo blisko siebie.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Tworzą one tzw. **pasma energetyczne**. Dwa najważniejsze to całkowicie obsadzone elektronami **pasmo walencyjne** oraz **pasmo przewodnictwa**, do którego mogą przejść elektrony po dostarczeniu im energii. Elektrony, które dostaną się do pasma przewodnictwa, stają się nośnikami ładunku i mogą brać udział w przewodzeniu prądu elektrycznego.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W metalach pasmo przewodnictwa nakłada się na pasmo walencyjne lub jest częściowo zapełnione, dlatego elektrony mogą się w nim swobodnie poruszać. W półprzewodnikach pomiędzy pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa występuje wąska przerwa energetyczna, co sprawia, że niewielka ilość energii (np. termicznej) pozwala elektronom przeskoczyć do pasma przewodnictwa. W izolatorach przerwa ta jest na tyle szeroka, że w normalnych warunkach większość elektronów nie jest w stanie przejść do pasma przewodnictwa. Szerokość pasma wzbronionego decyduje więc o właściwościach elektrycznych materiału i wpływa na jego zdolność do przewodzenia prądu elektrycznego.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Właściwości pierwiastków w dużej mierze wynikają z konfiguracji elektronów w warstwach (podpowłokach) s i p ich zewnętrznej powłoki. Wyróżniamy przy tym trzy zasadnicze grupy atomów:

Atomy elektroujemne – mają na zewnętrznej powłoce więcej niż cztery elektrony i w sprzyjających warunkach mogą przechwycić dodatkowy elektron, stając się jonami ujemnymi; często są to dielektryki.

Atomy elektrododatnie – posiadają mniej niż cztery elektrony walencyjne i w pewnych sytuacjach oddają je, tworząc jon dodatni; z reguły są to metale.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

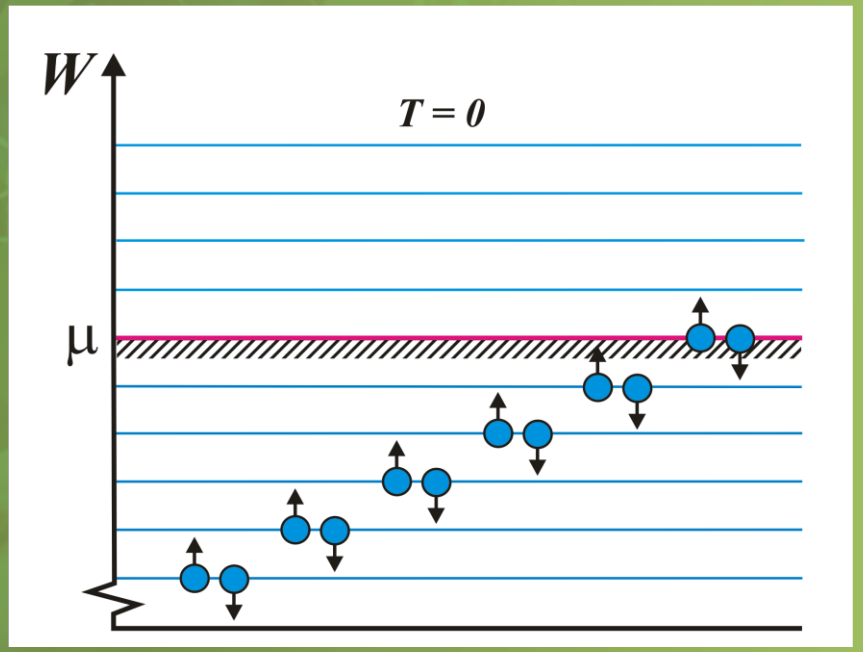
Dzięki rozwojowi mechaniki kwantowej opracowano kwantowy model ciała stałego o następujących założeniach:

- na jony i elektrony nie oddziaływają siły Coulomba.
- elektrony obsadzają parami poziomy począwszy od najniższego (spiny ich są ustawione antyrównolegle)
- elektrony znajdują się w studni potencjału
- obowiązuje zakaz Pauliego
- rozkład energii elektronów w gazie elektronowym podlega rozkładowi Fermiego

CC BY

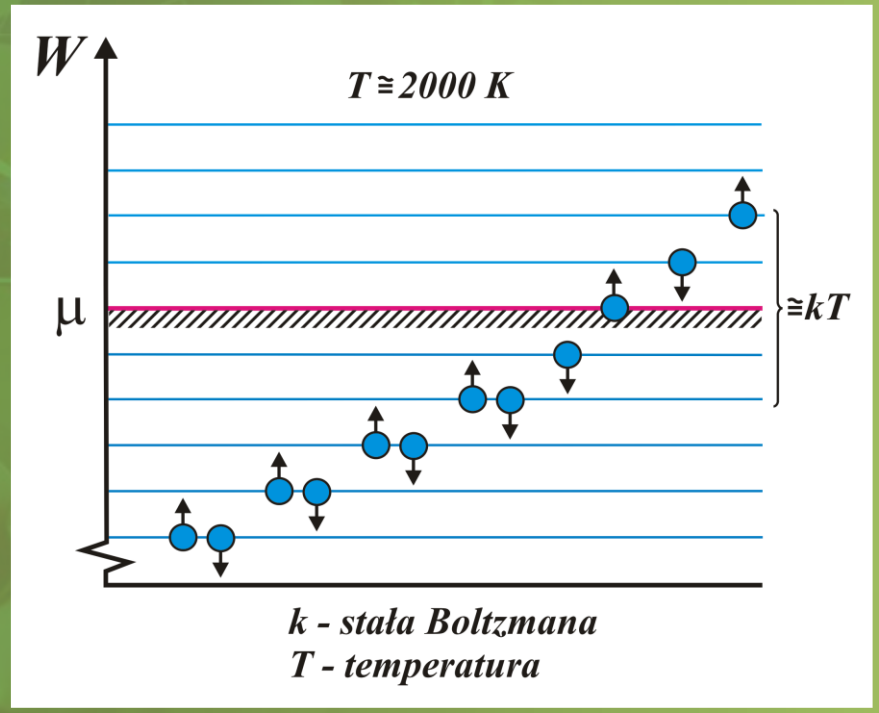
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W temperaturze T = 0K, zgodnie z zasadami kwantowej statystyki Fermiego–Diraca, elektrony w metalu zapełniają kolejne, dyskretne poziomy energetyczne, począwszy od najniższego stanu, aż do pewnej maksymalnej wartości energii. Ten najwyżej obsadzony stan w zerze absolutnym nazywany jest **poziomem Fermiego** (μ). Innymi słowy, w tej temperaturze nie ma możliwości, by jakikolwiek elektron miał energię większą niż energia Fermiego



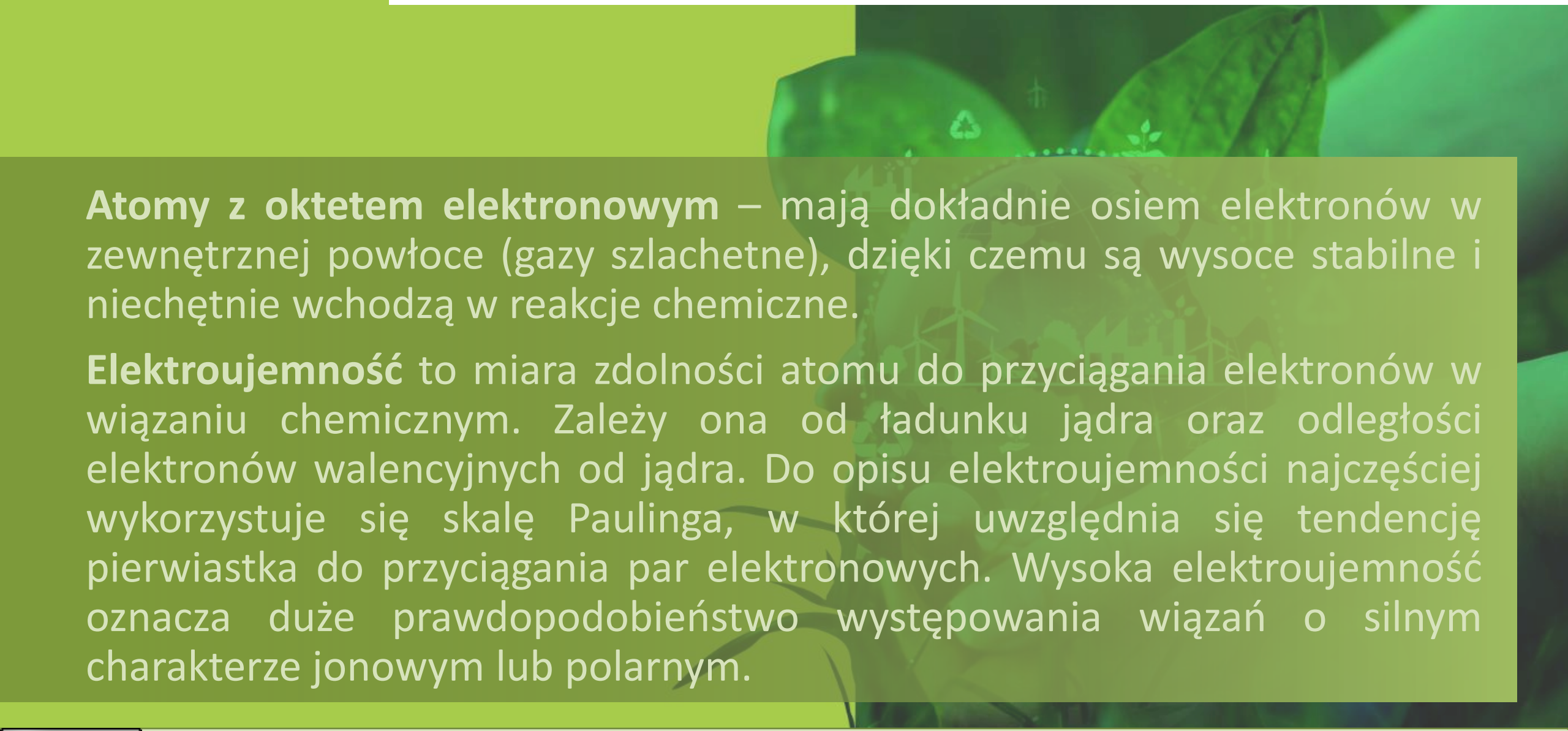
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W temperaturach wyższych od zera bezwzględnego część elektronów w metalu może uzyskać energię większą niż poziom Fermiego, co oznacza, że nie wszystkie stany powyżej tego poziomu są już puste. Następuje tak zwane „rozmycie” rozkładu obsadzenia poziomów energetycznych wokół poziomu Fermiego: im wyższa temperatura, tym większa liczba elektronów w wyższych stanach i odpowiednio mniejsza w niższych.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



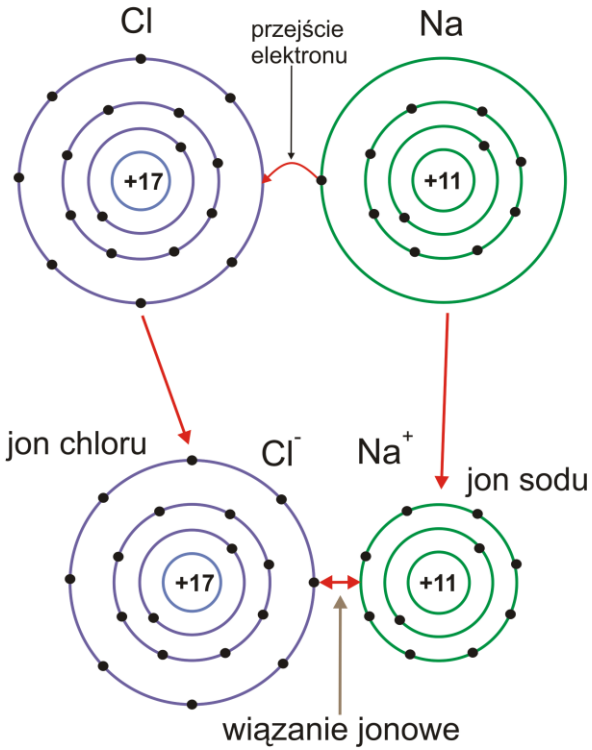
Atomy z oktetem elektronowym – mają dokładnie osiem elektronów w zewnętrznej powłoce (gazy szlachetne), dzięki czemu są wysoce stabilne i niechętnie wchodzą w reakcje chemiczne.

Elektroujemność to miara zdolności atomu do przyciągania elektronów w wiązaniu chemicznym. Zależy ona od ładunku jądra oraz odległości elektronów walencyjnych od jądra. Do opisu elektroujemności najczęściej wykorzystuje się skalę Paulinga, w której uwzględnia się tendencję pierwiastka do przyciągania par elektronowych. Wysoka elektroujemność oznacza duże prawdopodobieństwo występowania wiązań o silnym charakterze jonowym lub polarnym.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

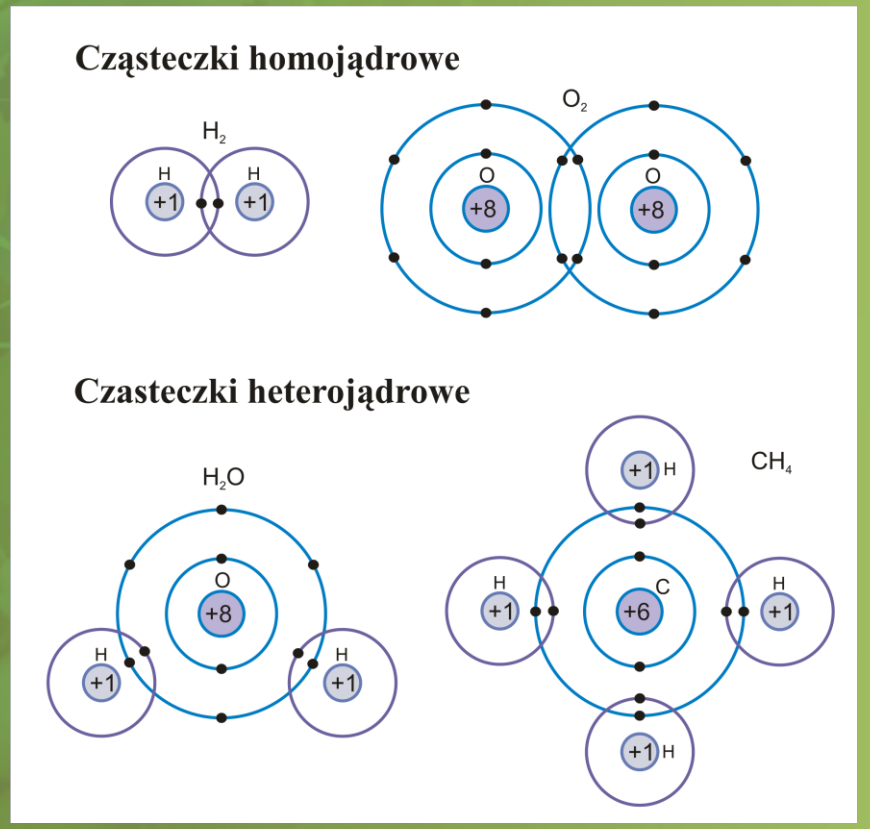
Wiązanie **jonowe powstaje, gdy atom o większej** elektroujemności przechwytuje elektron (bądź elektrony) od atomu o niższej elektroujemności, tworząc odpowiednio jon ujemny i dodatni. Istotą tego wiązania jest przyciąganie elektrostatyczne przeciwnie naładowanych jonów, które organizują się w strukturę. Przykładem związków jonowych są sole, powstające zwykle w wyniku reakcji metali z niemetalami.



Wiązanie jonowe pomiędzy atomami chloru i sodu

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

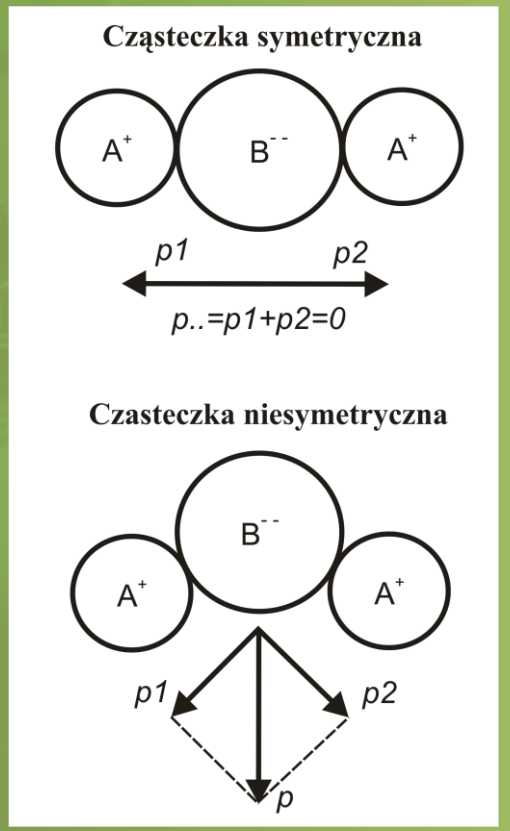
W cząsteczkach homojądrowych nie jest możliwa wymiana elektronów. W tego typu wiązaniach uzyskanie oktetu elektronowego jest możliwe dzięki współdzieleniu elektronów. W cząsteczce H_2 poprzez współdzielenie elektronów powstaje dublet elektronowy. Para elektronów w cząsteczce H_2 całkowicie zapełnia powłokę elektronową, a elektrony krążą wokół jąder, tworząc wspólne orbitalne chmury elektronowe.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

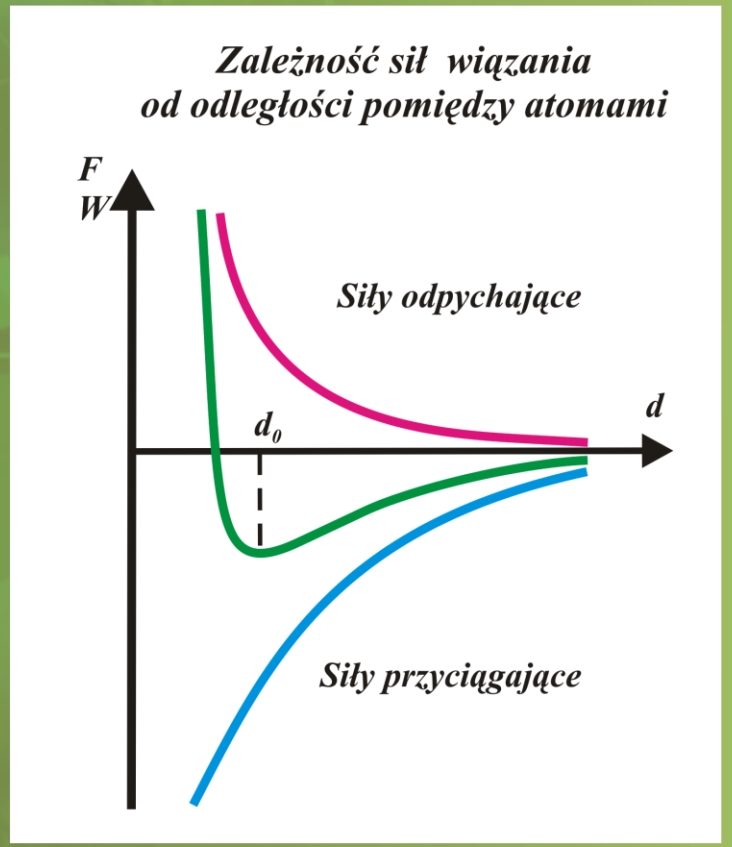
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Gdy wypadkowy środek ciężkości ładunków dodatnich pokrywa się z wypadkowym środkiem ciężkości ładunków ujemnych, cząsteczka jest symetryczna i pozostaje elektrycznie obojętna. Natomiast w sytuacji, gdy te dwa wypadkowe środki ciężkości się nie pokrywają, dochodzi do polaryzacji cząsteczki, w wyniku czego staje się ona **dipolem elektrycznym**.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

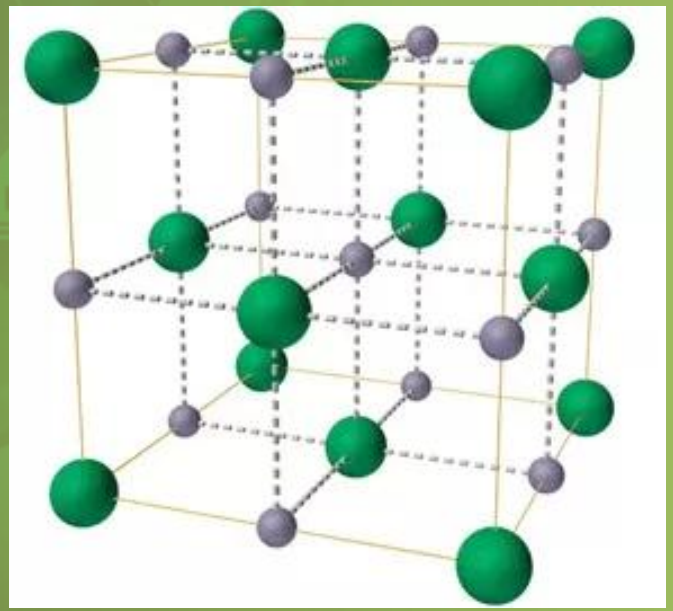
Oddziaływania przyciągające między atomami w cząsteczce sprawiają, że dochodzi do utworzenia wiązania, natomiast krótkiego zasięgu siły odpychające zapobiegają ich nadmiernemu zbliżeniu. Ostatecznie te dwie grupy sił równoważą się w odległości $d=d_0$. Energia wiązania W_0 ma wartość ujemną, równą energii W_d zwanej energią dysocjacji. Energia dysocjacji W_d określa wartość energii, jaką należy dostarczyć, aby rozdzielić atomy wchodzące w skład cząsteczki.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

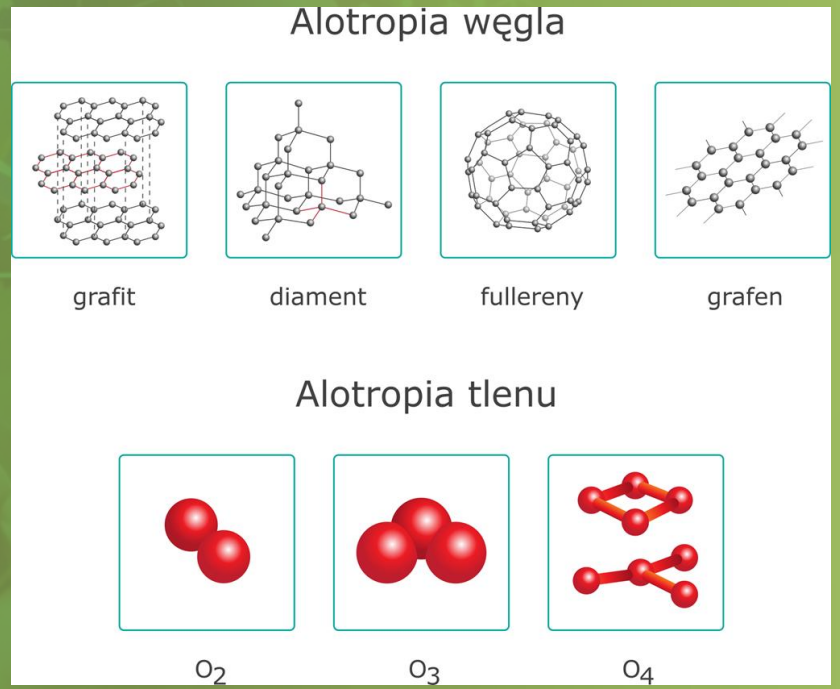
Ciała stałe mogą być pozbawione wewnętrznego uporządkowania (**ciała amorficzne**) lub cechować się regularną strukturą (**ciała krystaliczne**). W przypadku substancji krystalicznych przestrzeń jest wypełniona regularnie powtarzającymi się elementami, nazywanymi komórkami elementarnymi. Ich krawędzie przecinają się w ściśle określonych punktach, zwanych węzłami sieciowymi. Dzięki temu powstaje uporządkowana sieć krystaliczna obejmująca całe ciało stałe.



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Niektóre pierwiastki mogą krystalizować w różnych rodzajach (konfiguracjach) sieci krystalicznych. Na rodzaj sieci podczas krystalizacji wpływają temperatura i ciśnienie. Zjawisko to nazywa się **polimorfizmem** lub **alotropią**, a formy krystaliczne określane są jako odmiany alotropowe. Odmiany te są trwałe tylko w określonym zakresie temperatur, natomiast poza tym zakresem zachodzi ich całkowite przekrystalizowanie.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Właściwości materiałów przewodzących.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Najistotniejsze właściwości materiałów przewodzących stosowanych w elektrotechnice to właściwości cieplne, mechaniczne i elektryczne. Do właściwości cieplnych zaliczamy:

- Temperatura topnienia
- Temperatura wrzenia
- Współczynnik przewodzenia ciepła
- Współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Do właściwości mechanicznych zaliczamy:

- Wytrzymałość na rozciąganie
- Wydłużenie przy zerwaniu
- Gęstość masy

Do właściwości elektrycznych zaliczamy:

- Rezystywność ρ
- Temperaturowy współczynnik rezystancji α

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Temperatura topnienia – temperatura, w której ciało przechodzi ze stanu stałego do ciekłego.

Temperatura wrzenia – temperatura, w której parowanie cieczy występuje w całej jej objętości.

Współczynnik przewodzenia ciepła λ – opisuje zdolność substancji do przekazywania energii wewnętrznej przez przewodzenie ciepła.

$$Q = \lambda \frac{S \Delta T t}{d}, [J]$$

Gdzie: Q – ilość przekazywanej energii cieplnej, ΔT – różnica temperatur,

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

S – pole powierzchni przekroju poprzecznego przegrody, t – czas przepływu ciepła, d – grubość przegrody.

Współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej – opisuje zmianę rozmiaru ciała przy wzroście temperatury o 1 K.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L}\frac{1}{\Delta T}, \left[\frac{1}{K}\right]$$

Gdzie: L – dowolny wymiar liniowy ciała (np. grubość, długość), ΔL – zmiana wymiaru liniowego na skutek temperatury, ΔT – zmiana temperatury

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Gęstość masy ρ – stosunek masy substancji do jej objętości.

$$\rho = \frac{m}{V}, \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Gdzie: m – masa ciała, V – objętość ciała.

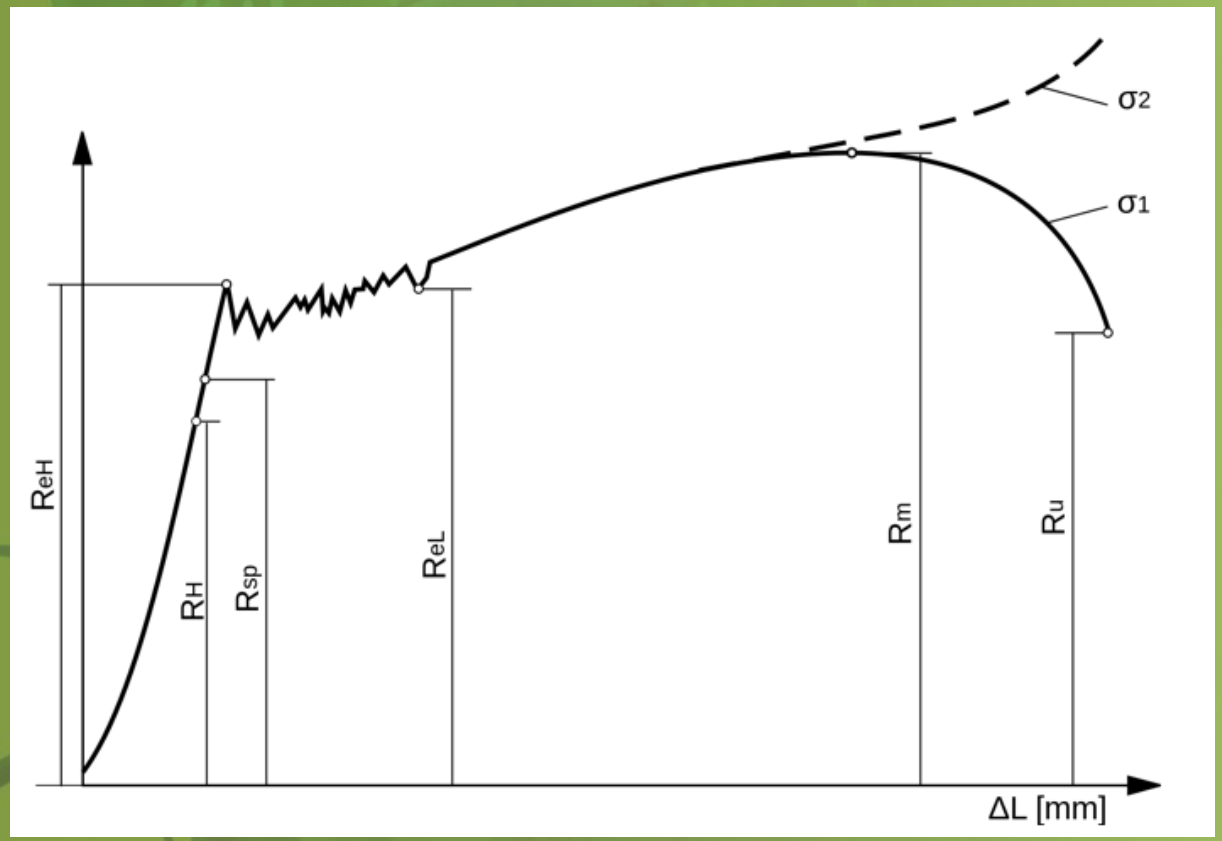
Wydłużenie przy zerwaniu – stosunek zmiany długości próbki w momencie zerwania do długości początkowej próbki, wyrażony w procentach

$$A = \frac{l_m - l_0}{l_0} \cdot 100\%, [\%]$$

Gdzie: l_0 – długość próbki nieobciążonej, l_m – długość próbki przy zerwaniu

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wytrzymałość na rozciąganie – jest to stosunek największej siły rozciągającej uzyskanej w czasie statycznej próby rozciągania odniesionej do pierwotnego pola przekroju poprzecznego próbki.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Miedź jest jednym z najważniejszych i najczęściej stosowanych metali w elektrotechnice. Jej główną zaletą jest wysoka konduktywność, która ustępuje jedynie srebru. Cechuje się dobrą przewodnością cieplną. Wadą miedzi jest jej korozyjność w obecności siarki. W sytuacjach, gdy miedź musi znajdować się w otoczeniu związków siarki, poddaje się ją cynowaniu. Miedź jest również składnikiem stopów, takich jak brązy cynowe (miedź z cyną) i mosiądz (miedź z cynkiem).

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Właściwości elektryczne, cieplne i mechaniczne miedzi.

Właściwość	Wartość
Rezystywność ρ	$17.2*10^{-9}$ Ωm
Temperaturowy współczynnik rezystancji α	0.0041 1/K
Gęstość masy	8890 kg/m^3
Wytrzymałość na rozciąganie	$(20 – 26)* 10^7$ N/m^2
Wydłużenie przy zerwaniu	(15 – 30)%

Właściwość	Wartość
Temperatura topnienia	1356 K
Temperatura wrzenia	2868 K
Współczynnik przewodzenia ciepła	395 W/m*K
Współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej	$1.7*10^{-5}$ 1/K

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Aluminium jest metalem szeroko stosowanym w elektrotechnice ze względu na swoją niską gęstość (ok. trzykrotnie niższą niż gęstość miedzi) oraz niższą cenę w porównaniu do miedzi. Aluminium charakteryzuje się dobrą konduktywnością (ok. 60% konduktywności miedzi). Aluminium cechuje się także wysoką odpornością na korozję, ponieważ w obecności tlenu pokrywa się warstwą tlenku aluminium, która zapobiega dalszemu utlenianiu.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Właściwości elektryczne, cieplne i mechaniczne aluminium.

Właściwość	Wartość
Rezystywność ρ	$28.7*10^{-9}$ Ωm
Temperaturowy współczynnik rezystancji α	0,0040 1/K
Gęstość masy	2700 kg/m^3
Wytrzymałość na rozciąganie	(8 – 17)* 10^7 N/m^2
Wydłużenie przy zerwaniu	ok. 2.5 %

Właściwość	Wartość
Temperatura topnienia	931 K
Temperatura wrzenia	2273 K
Współczynnik przewodzenia ciepła	222 W/m*K
Współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej	$2.4*10^{-5}$ 1/K

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Ołów znajduje ograniczone, choć istotne, zastosowanie w elektrotechnice. Stosowany jest przy produkcji akumulatorów kwasowo-ołowiowych oraz osłon kabli dzięki swojej plastyczności i odporności na korozję. Wykorzystywany jest również jako zabezpieczenie przed promieniowaniem elektromagnetycznym. Główną wadą ołowiu jest jego wysoka gęstość oraz duża rezystywność. Ołów jest toksycznym metalem ciężkim, stanowiącym zagrożenie dla zdrowia i środowiska.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Właściwości elektryczne, cieplne i mechaniczne ołowiu.

Właściwość	Wartość
Rezystywność ρ	$208*10^{-9}$ Ωm
Temperaturowy współczynnik rezystancji α	0,0040 1/K
Gęstość masy	11300 kg/m^3
Wytrzymałość na rozciąganie	$1.5* 10^7$ N/m^2
Wydłużenie przy zerwaniu	ok. 60 %

Właściwość	Wartość
Temperatura topnienia	600 K
Temperatura wrzenia	1833 K
Współczynnik przewodzenia ciepła	35.3 W/m*K
Współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej	$3.13*10^{-5}$ 1/K

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Szeroko w elektrotechnice stosowane są stopy metali. Przykładem może być **spoiwo lutownicze Sn60Pb40**, którego skład to 60% cyny i 40% ołowiu. Atutem tego stopu jest niska temperatura topnienia wynosząca 183–190 °C. Stosowane jest głównie do lutowania miękkiego miedzi i szeroko wykorzystywane w elektronice. Posiada dobre właściwości zwilżające, tzn. spoiwo dobrze rozprowadza się po lutowanych powierzchniach. Jego główną wadą jest obecność toksycznego ołowiu.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Właściwości elektryczne, cieplne i mechaniczne spoiwa Sn60Pb40.

Właściwość	Wartość
Rezystywność ρ	$153*10^{-9}$ Ωm
Temperaturowy współczynnik rezystancji α	ok. 0.004 1/K
Gęstość masy	8500 kg/m^3
Wytrzymałość na rozciąganie	5.2* 10^7 N/m^2
Wydłużenie przy zerwaniu	ok. 40 %

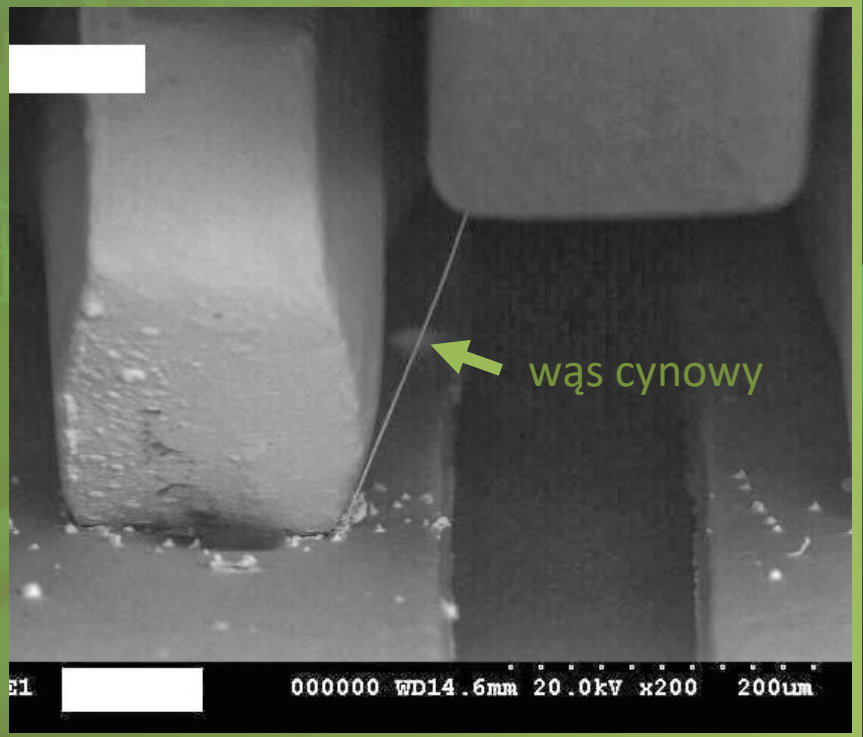
Właściwość	Wartość
Temperatura topnienia	456 K
Temperatura wrzenia	-
Współczynnik przewodzenia ciepła	49 W/m*K
Współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej	-

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Aby zredukować zastosowanie niebezpiecznego dla człowieka i środowiska ołowiu, opracowano bezołowiowe spoiwa lutownicze. Jednym z najpopularniejszych jest spoiwo **Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC305)**. Temperatura topnienia tego spoiwa wynosi około 217–221 °C. Charakteryzuje się dobrą przewodnością elektryczną (niższą rezystywnością w porównaniu do Sn60Pb40). Stop ten odznacza się również wysoką wytrzymałością mechaniczną oraz dobrymi parametrami zwilżalności.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wadą spoiwa SAC305 jest wyższa temperatura topnienia (w porównaniu do Sn60Pb40) co może skutkować przegrzaniem delikatnych części elektronicznych. Ze względu na zawartość srebra jego cena jest wyższa w porównaniu do spoiwa Sn60Pb40. W połączeniach wykonanych tym spoiwem może występować niebezpieczne zjawisko wąsów cynowych (ang. whiskers) polegające na powstawaniu mikroskopijnych struktur mogących powodować zwarcia.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Właściwości elektryczne, cieplne i mechaniczne spoiwa Sn96,5Ag3Cu0,5.

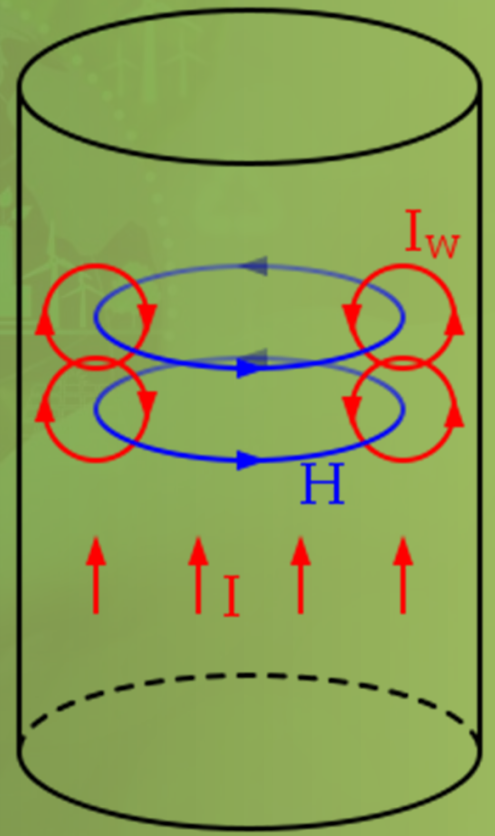
Właściwość	Wartość
Rezystywność ρ	$132*10^{-9}$ Ωm
Temperaturowy współczynnik rezystancji α	ok. 0.004 1/K
Gęstość masy	7380 kg/m^3
Wytrzymałość na rozciąganie	4.9* 10^7 N/m^2
Wydłużenie przy zerwaniu	ok. 19 %

Właściwość	Wartość
Temperatura topnienia	490 K
Temperatura wrzenia	-
Współczynnik przewodzenia ciepła	58 W/m*K
Współczynnik temperaturowy rozszerzalności cieplnej	-

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Jednym z powodów występowania strat w materiałach przewodzących jest **efekt naskórkowości**. Występuje on w obwodach prądu przemiennego i nasila się wraz ze wzrostem częstotliwości. W zjawisku tym przemienny prąd elektryczny nie przepływa równomiernie przez przekrój przewodnika. Przepływ prądu koncentruje się w warstwie przy powierzchni, a jego gęstość maleje w kierunku wnętrza przewodnika.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Nierównomierny rozkład prądu elektrycznego w przewodniku, skutkujący efektywnym zmniejszeniem jego przekroju przewodzącego, prowadzi do zwiększenia strat energetycznych. Straty te, wynikające z efektu naskórkowego, określane są jako straty dodatkowe. W celu ich opisania wprowadza się współczynnik strat dodatkowych k_f :

$$k_f = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} \rightarrow R_{AC} = k_f R_{DC}$$

Gdzie: P_{AC} - moc strat dla prądu przemiennego, P_{DC} - moc strat dla prądu stałego, R_{AC} - rezystancja dla prądu przemiennego, R_{DC} - rezystancja dla prądu stałego

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Miarą zmian gęstości prądu jest zastępcza głębokość wnikania ϑ_w. Określa ona głębokość na której gęstość prądu jest o 1/e (e≈2,72) razy mniejsza (ok. 37%) niż na powierzchni przewodnika.

$$\vartheta_w = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}}$$

Gdzie: ρ – rezystywność, ω – pulsacja napięcia, μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni, μ_r - względna przenikalność magnetyczna

Używanie średnic przewodów bądź grubości szyn powyżej (1-1,5) ϑ_w jest nieuzasadnione ekonomicznie.

CC BY

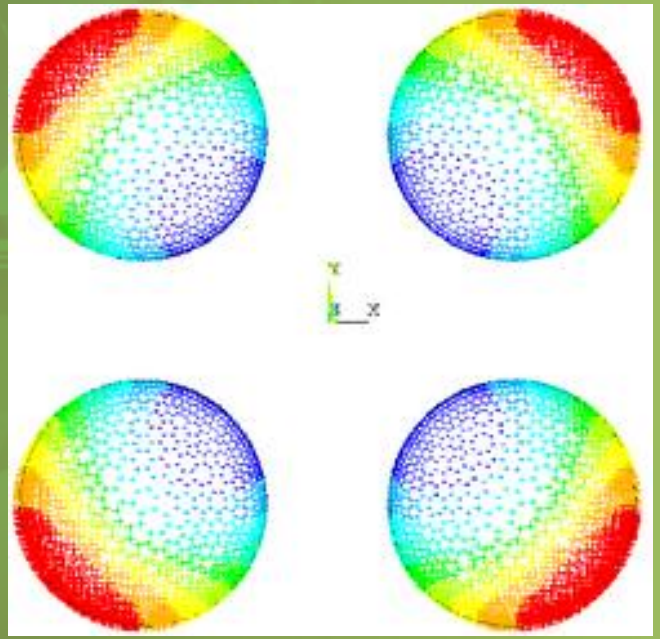
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Zjawisko zbliżenia to efekt wzajemnego oddziaływania przewodników, przez które przepływa prąd przemienny. Powoduje ono zmianę rozkładu gęstości prądu w każdym z przewodników na skutek ich wzajemnych oddziaływań elektromagnetycznych.

Określane współczynnikiem k_z, który może przyjmować wartości:

>1 – dla prądów płynących w tym samym kierunku

<1 – dla prądów płynących w przeciwnych kierunkach



CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Głównym źródłem strat występujących w przewodnikach są straty cieplne wynikające z jego oporu elektrycznego. Zgodnie z **prawem Joule'a-Lenza** energia elektryczna zamieniana jest na ciepło:

$$\Delta P_R = I^2 R, [W]$$

Gdzie: ΔP_R – moc rezystancyjnych strat cieplnych, I – natężenie prądu elektrycznego, R – rezystancja przewodnika.

Ostatecznie moc strat cieplnych określane jest jako:

$$\Delta P = k_f k_z \, I^2 R$$

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Metody ograniczania strat rezystancyjnych:

- Zastosowanie materiałów o niskiej rezystywności (miedź, aluminium)
- Zwiększenie przekroju przewodnika

Metody ograniczania strat związanych ze zjawiskiem naskórkowości:

- Stosowanie przewodów licowych zamiast przewodów litych
- Zastosowanie przewodów rurowych

Metody ograniczania strat związanych ze zjawiskiem zbliżenia:

- Prowadzenie przewodów z zachowaniem odpowiednich odległości

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

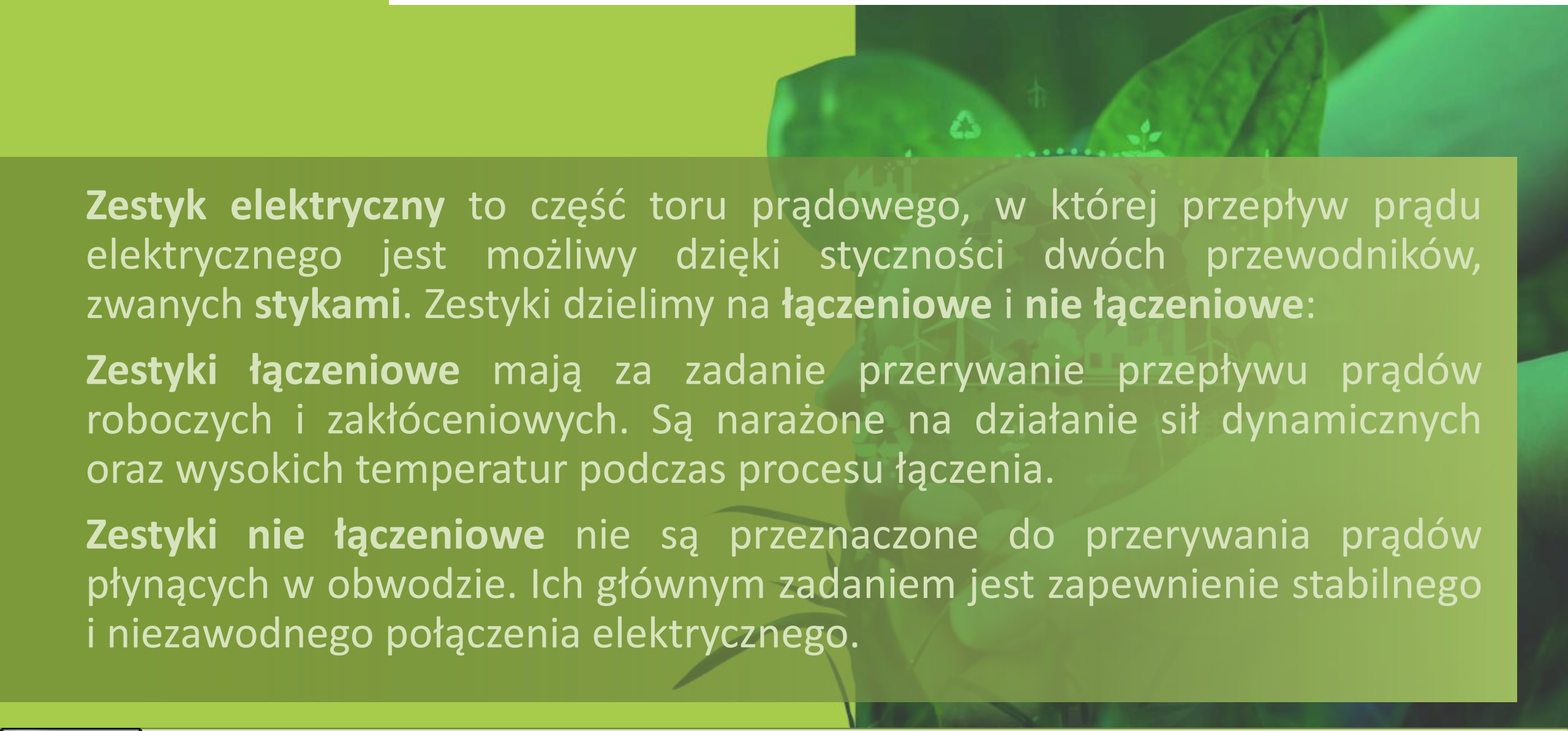
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Materiały na styki elektryczne.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Zestyk elektryczny to część toru prądowego, w której przepływ prądu elektrycznego jest możliwy dzięki styczności dwóch przewodników, zwanych **stykami**. Zestyki dzielimy na **łączeniowe** i **nie łączeniowe**:

Zestyki łączeniowe mają za zadanie przerywanie przepływu prądów roboczych i zakłóceniowych. Są narażone na działanie sił dynamicznych oraz wysokich temperatur podczas procesu łączenia.

Zestyki nie łączeniowe nie są przeznaczone do przerywania prądów płynących w obwodzie. Ich głównym zadaniem jest zapewnienie stabilnego i niezawodnego połączenia elektrycznego.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W zależności od rodzaju powierzchni styczności występującej pomiędzy zestykami możemy podzielić je na punktowe, liniowe i powierzchniowe.

Zestyki punktowe powstają, gdy zestyk tworzony jest przez elementy w kształcie półkul. Przykładem mogą być zestyki przekaźników wykorzystywanych w obwodach niskiej mocy.

Zestyki liniowe powstają, gdy zestyk tworzony jest poprzez styczność płaszczyzny i walca.

Zestyki powierzchniowe powstają, gdy zestyk tworzą dwie płaszczyzny, np. w połączeniu dwóch szyn toru prądowego.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Rezystancja przewodnika, który został przecięty, a następnie ponownie połączony poprzez zestyk, jest wyższa od rezystancji przewodnika litego. Wynika to z obecności dodatkowych rezystancji kontaktowych, które są związane z właściwościami zestyku.

Rezystancja przejścia jest rezultatem nierównomierności powierzchni zestyku. Powierzchnie stykające się ze sobą nigdy nie są idealnie gładkie, co prowadzi do ograniczenia efektywnego przekroju przewodnika w miejscu połączenia. Rzeczywisty przekrój przewodnika stanowi sumę powierzchni pojedynczych punktów styczności. W efekcie przepływ prądu koncentruje się w tych punktach, powodując lokalne zwiększenie gęstości prądu, co

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

skutkuje wzrostem temperatury zestyku. Zjawisko to, ze względu na wzrost rezystywności metali wraz ze wzrostem temperatury, prowadzi do dalszego wzrostu rezystancji zestyku.

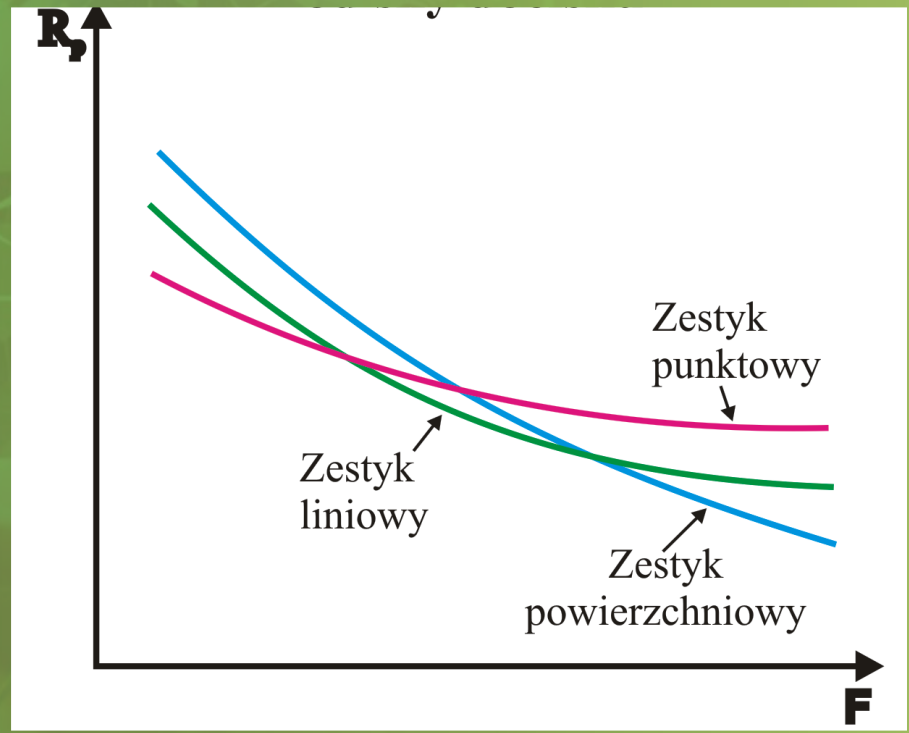
Rezystancja warstw nalotowych, jest spowodowana korozją materiału zestyku. Pod wpływem wzrostu temperatury zestyku wokół punktów styczności powstają tlenki, siarczki lub inne związki chemiczne, których rezystancja jest wielokrotnie wyższa od rezystancji materiału zestyku.

Rezystancja warstwy absorpcyjnej jest związana z obecnością na powierzchni zestyku cienkiej warstwy gazów.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wraz ze wzrostem siły docisku maleje rezystancja zestykowa. Zjawisko to jest związane z deformacją mikroskopijnych nierówności powierzchni zestyku, co prowadzi do zwiększenia liczby punktów styczności, a tym samym do zwiększenia efektywnej powierzchni styczności. Rodzaj zastosowanego zestyku przy danej sile docisku ma istotny wpływ na wartość rezystancji zestykowej.



CC BY

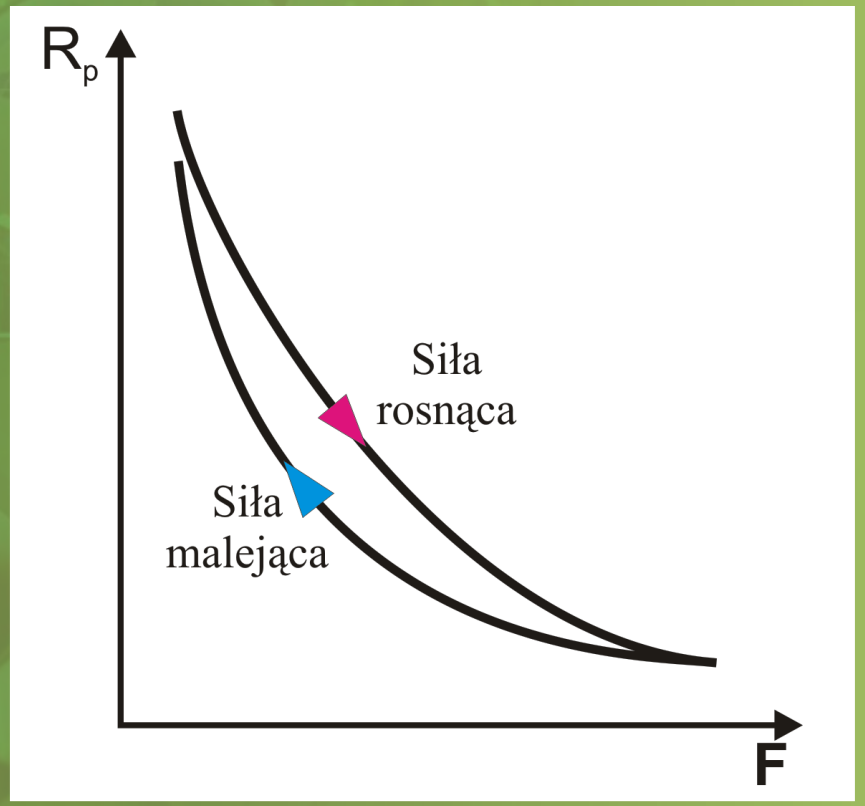
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przy niewielkich siłach docisku najniższą rezystancję zestykową wykazują zestyki punktowe. W zestyku punktowym powierzchnia styczności jest bardzo mała, co umożliwia lokalne odkształcenie nierówności powierzchni nawet przy niewielkim nacisku. W efekcie następuje zmniejszenie rezystancji przejścia. Przy dużych siłach docisku najniższą rezystancję zestykową wykazuje zestyk powierzchniowy. Wysoka siła nacisku powoduje deformację mikroskopijnych nierówności na dużej powierzchni kontaktu, co prowadzi do zwiększenia rzeczywistego przekroju, przez który zachodzi przewodzenie prądu. W przypadku średnich wartości siły docisku najniższą rezystancją zestykową osiąga zestyk liniowy.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W przypadku, gdy siła docisku zestyków jest zmienna, obserwuje się **zjawisko histerezy rezystancji zestykowej** w funkcji siły docisku. Histereza to zjawisko, w którym stan danego układu zależy nie tylko od bieżącego bodźca, lecz również od jego wcześniejszego przebiegu. Skutkiem tego jest różnica między krzywą dla siły rosnącej a krzywą dla siły malejącej.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przebieg dla siły rosnącej:

- Początkowo, na skutek działającej siły, powstają odkształcenia sprężyste (nietrwałe), których skutkiem jest obniżenie rezystancji przejścia.
- Przy dalszym wzroście siły działającej na styki pojawiają się odkształcenia plastyczne (trwałe), które prowadzą do tzw. formowania się zestyku. Proces ten powoduje dalsze obniżenie rezystancji przejścia.

Przebieg dla siły malejącej:

- Początkowo maleje składowa związana z odkształceniami sprężystymi, co powoduje wzrost rezystancji przejścia.

CC BY

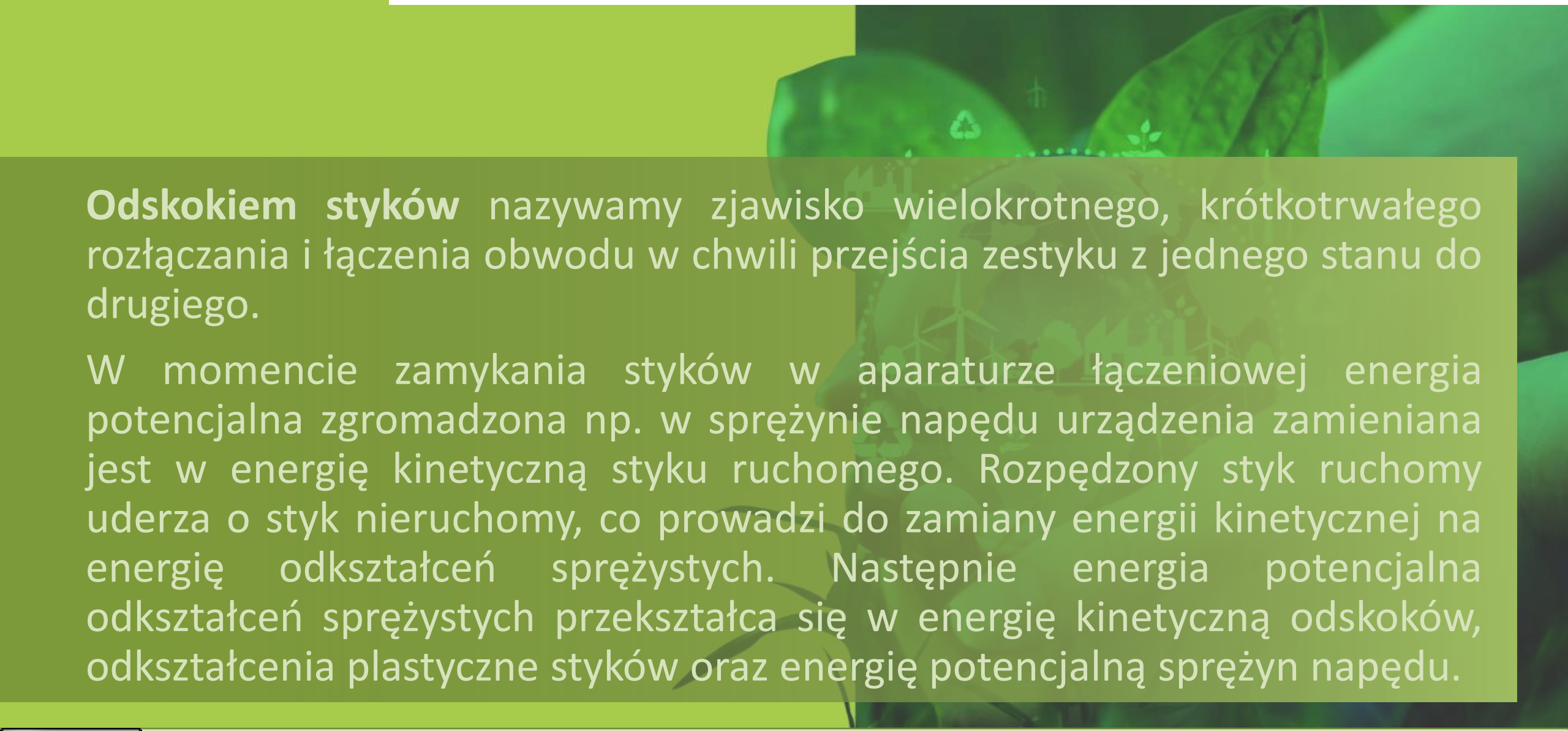
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

- Ze względu na wcześniejsze formowanie się zestyku, znaczna część połączeń utworzonych w wyniku odkształceń plastycznych nadal bierze udział w przewodzeniu prądu elektrycznego.

Skutkiem procesu formowania się styków jest występowanie mniejszej rezystancji zestykowej w przypadku malejącej siły docisku w porównaniu do rezystancji zestykowej tego samego zestyku przy tej samej sile docisku, gdy siła ta jest rosnąca.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

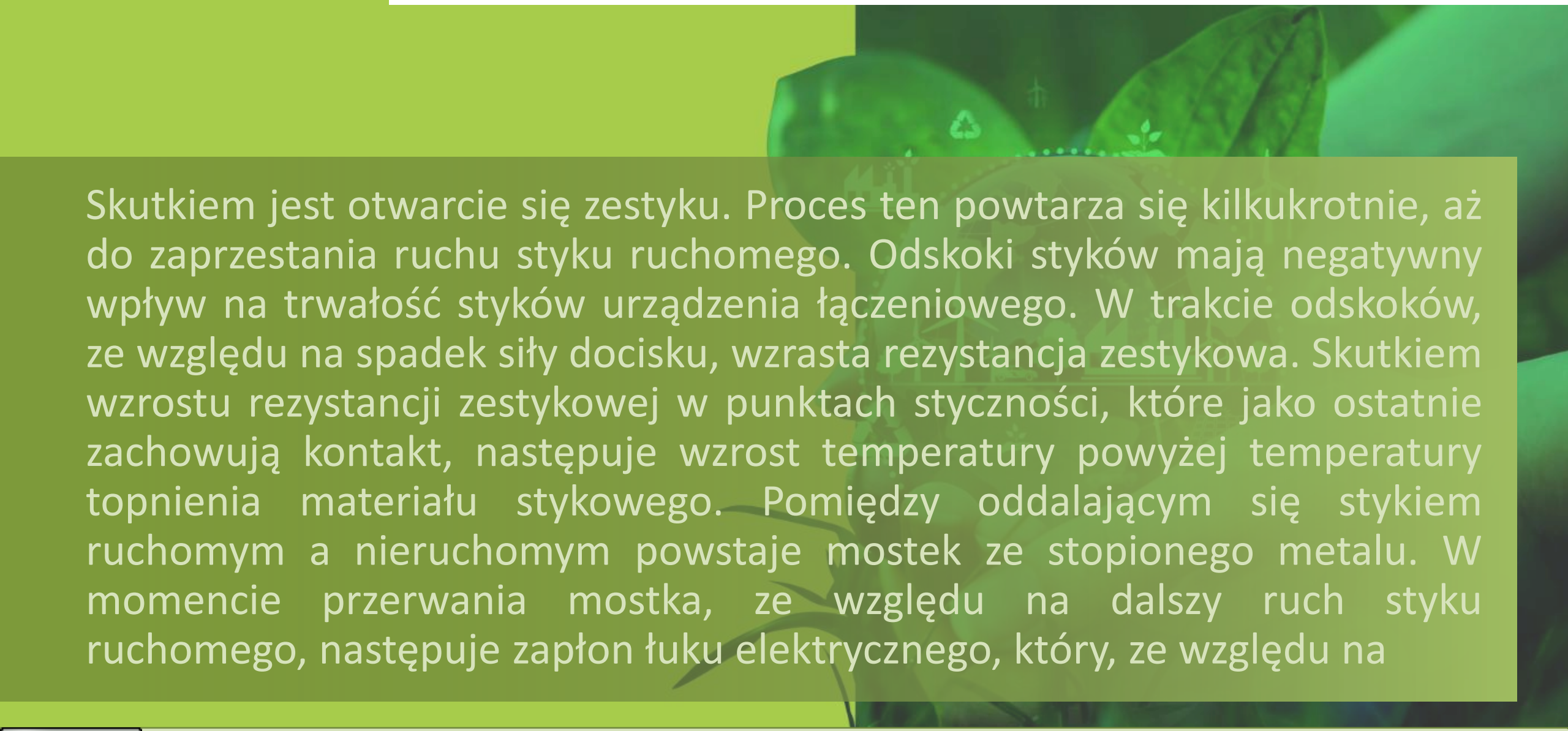


Odskokiem styków nazywamy zjawisko wielokrotnego, krótkotrwałego rozłączania i łączenia obwodu w chwili przejścia zestyku z jednego stanu do drugiego.

W momencie zamykania styków w aparaturze łączeniowej energia potencjalna zgromadzona np. w sprężynie napędu urządzenia zamieniana jest w energię kinetyczną styku ruchomego. Rozpędzony styk ruchomy uderza o styk nieruchomy, co prowadzi do zamiany energii kinetycznej na energię odkształceń sprężystych. Następnie energia potencjalna odkształceń sprężystych przekształca się w energię kinetyczną odskoków, odkształcenia plastyczne styków oraz energię potencjalną sprężyn napędu.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Skutkiem jest otwarcie się zestyku. Proces ten powtarza się kilkukrotnie, aż do zaprzestania ruchu styku ruchomego. Odskoki styków mają negatywny wpływ na trwałość styków urządzenia łączeniowego. W trakcie odskoków, ze względu na spadek siły docisku, wzrasta rezystancja zestykowa. Skutkiem wzrostu rezystancji zestykowej w punktach styczności, które jako ostatnie zachowują kontakt, następuje wzrost temperatury powyżej temperatury topnienia materiału stykowego. Pomiędzy oddalającym się stykiem ruchomym a nieruchomym powstaje mostek ze stopionego metalu. W momencie przerwania mostka, ze względu na dalszy ruch styku ruchomego, następuje zapłon łuku elektrycznego, który, ze względu na

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

wysoką temperaturę, powoduje odparowanie materiału stykowego. Odległość pomiędzy stykami wzrasta, łuk gaśnie, a styk ruchomy osiąga położenie maksymalne i ponownie przemieszcza się w kierunku styku nieruchomego, prowadząc do zamknięcia styku. Ze względu na obecność stopionego materiału stykowego może dojść do zespawania powierzchni styczności. Następuje kolejny odskok, który zrywa wcześniej utworzone połączenia. Proces ten powtarza się aż do zaniknięcia odskoków. Skutkiem odskoków zestyków jest przyspieszona degradacja powierzchni zestykowych, co prowadzi do:

- wzrostu rezystancji zestykowej

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

- skrócenia czasu życia urządzenia
- zwiększenia strat energii

W celu ograniczenia zjawiska odskoków styków, stosowane są nasepujące metody:

- konstruowanie styków ruchomych o dużej bezwładności
- zamykanie zestyku przy niewielkich prędkościach styku ruchomego (w praktyce nie zawsze jest to możliwe)
- stosowanie tłumików (amortyzatorów), których zadaniem jest

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

rozproszenie energii kinetycznej styku ruchomego w trakcie odskoku

- stosowanie odpowiednio wysokich sił docisku
- stosowanie konstrukcji wykorzystujących oddziaływania elektrodynamiczne

Praca styków prowadzi do stopniowej ich erozji. Ze względu na przyczynę, erozję dzielimy na mechaniczną i elektrotermiczną.

Erozja mechaniczna jest powodowana przez wielokrotne zderzanie powierzchni stykowych oraz tarcie pomiędzy stykami.

CC BY

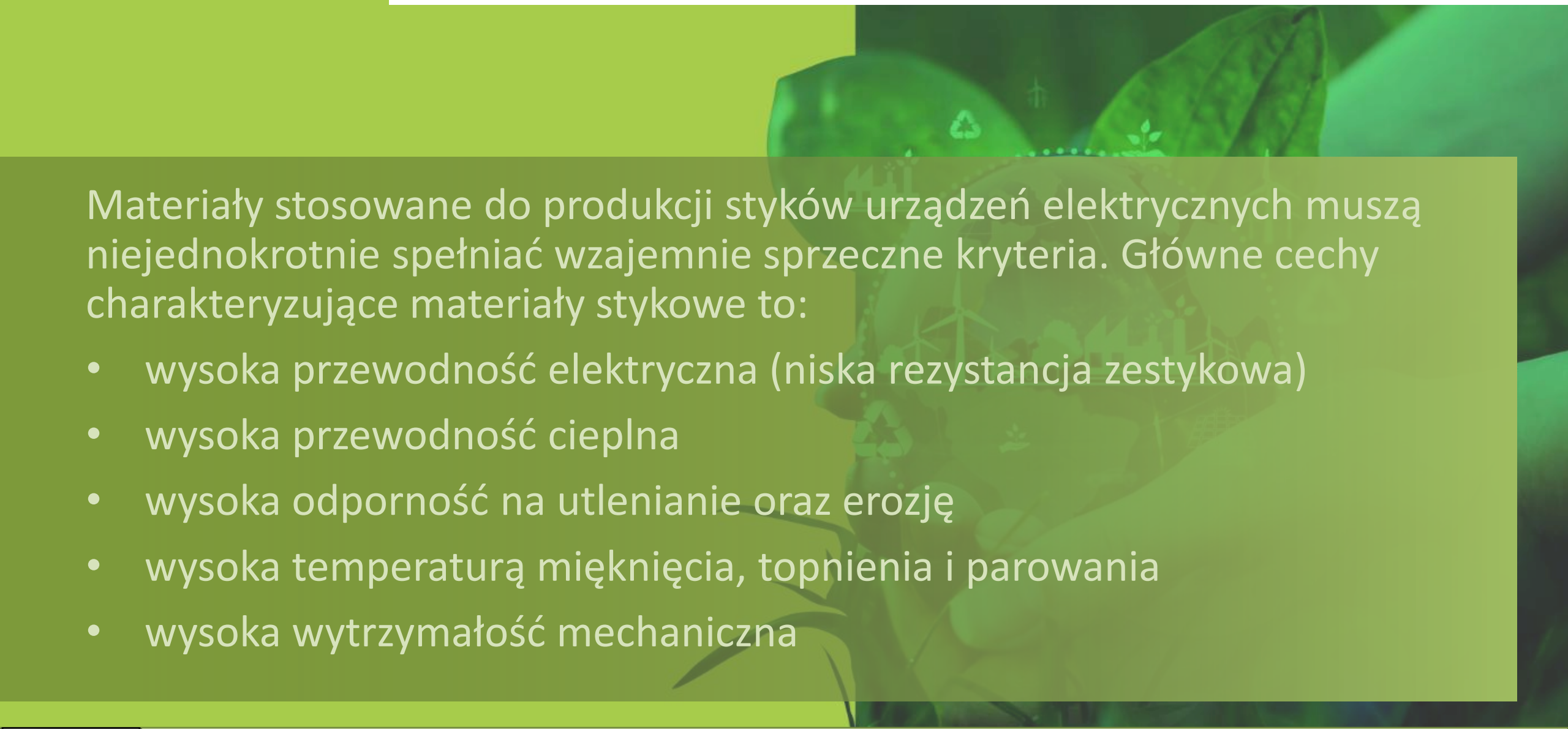
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Erozja elektrotermiczna wynika z odparowywania materiału stykowego pod wpływem wysokich temperatur, które są głównie związane z działaniem łuku elektrycznego oraz wędrówką materiału pomiędzy stykami.

Zjawisko wędrówki materiału stykowego uwidacznia się szczególnie w zestykach przewodzących prąd stały. W ich przypadku, w trakcie otwierania zestyku, mostek z ciekłego metalu zostaje przerwany w pobliżu anody. Skutkiem tego jest zwiększenie objętości styku katodowego kosztem zmniejszenia objętości styku anodowego. Zjawisko to prowadzi do asymetrycznego zużycia zestyków, co może skutkować skróceniem ich trwałości oraz koniecznością częstszej konserwacji lub wymiany.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Materiały stosowane do produkcji styków urządzeń elektrycznych muszą niejednokrotnie spełniać wzajemnie sprzeczne kryteria. Główne cechy charakteryzujące materiały stykowe to:

- wysoka przewodność elektryczna (niska rezystancja zestykowa)
- wysoka przewodność cieplna
- wysoka odporność na utlenianie oraz erozję
- wysoka temperaturą mięknięcia, topnienia i parowania
- wysoka wytrzymałość mechaniczna

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

- łatwość obróbki i wytwarzania
- niska cena

Materiały na styki i ich pokrycia możemy podzielić ze względu na technologię wykonywania na:

- metale czyste – np. miedź, srebro, wolfram, nikiel, pallad, molibden)
- stopy metali – np. srebro ze złotem, platyna z irydem.
- spieki – np. srebro z tlenkiem kadmu, srebro z niklem.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych ze **srebra**:

- wysoka przewodność cieplna i elektryczna
- niska odporność na erozję i działanie łuku elektrycznego
- wrażliwe na działanie siarki
- łatwo ulega ścieraniu
- podatne na wędrówkę materiału
- łatwe w obróbce

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych z **miedzi**:

- wysoka przewodność
- dostateczna wytrzymałość mechaniczna
- dobre właściwości technologiczne
- niska odporność na erozję i działanie łuku elektrycznego
- wymaga wysokich sił docisku
- reaguje z siarką

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych ze **złota**:

- wysoka odporność chemiczna, skutkująca stabilnością parametrów elektrycznych
- wysoka przewodność (trzecia najwyższa przewodność po srebrze i miedzi)
- wysoka stabilność rezystancji przejścia
- skłonność do upalania i zespawania styków
- niewielka twardość i duża ścieralność

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych z **platyny**:

- wysoka odporność na zużycie mechaniczne i elektryczne
- wysoka odporność chemiczna
- odporna na upalanie i korozję
- podatna na wędrówkę materiału
- mała przewodność elektryczna
- wysoka cena

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych z **palladu**:

- wysoka odporność na ścieranie
- wysoka twardość i odporność na erozję łukową
- wysoka temperatura topnienia (1555 °C)
- doskonała stabilność chemiczna
- wysoki koszt
- relatywnie dobra przewodność elektryczna
- reaguje z siarką

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych z **niklu**:

- wysoka odporność na korozję
- relatywnie wysoka przewodność elektryczna
- wysoka odporność na działanie łuku elektrycznego
- tworzenie warstw tlenkowych
- wysoka wytrzymałość mechaniczna i odporność na ścieranie

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych z **wolframu**:

- najwyższa temperatura topnienia (ok. 3414 °C)
- najwyższa odporność na działanie łuku elektrycznego
- wysoka twardość i odporność na ścieranie
- niska przewodność elektryczna
- konieczność stosowania dużych sił docisku
- trudne w obróbce mechanicznej

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy styków wykonanych z **molibdenu**:

- wysoka temperatura topnienia (2623 °C)
- wysoka skłonność do utleniania (np. w porównaniu do wolframu)
- wysoka wytrzymałość mechaniczna i odporność na ścieranie
- niska przewodność elektryczna (choć nieznacznie wyższa niż wolframu)

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jednym ze sposobów modyfikacji parametrów materiału stykowego w celu osiągnięcia lepszych właściwości elektrycznych, mechanicznych i cieplnych jest stosowanie stopów i spieków metali.

Skutkiem zastosowania mieszanin substancji jest uzyskanie korzyści wynikających z połączenia zalet poszczególnych składników. Zazwyczaj stosuje się połączenia materiałów o dobrych parametrach elektrycznych (np. wysokiej przewodności) z materiałami o korzystnych cechach mechanicznych (np. odporności na działanie wysokiej temperatury łuku elektrycznego).

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przykłady najczęściej stosowanych **stopów i spieków metali**:

- Srebro z miedzią (Ag-Cu), – materiał ten łączy wysoką przewodność srebra z mechaniczną trwałością i niskim kosztem miedzi.
- Srebro z niklem (Ag-Ni) – łączy odporność na zużycie mechaniczne niklu z dobrą przewodnością srebra, a także charakteryzuje się niską podatnością na wędrówkę materiału.
- Miedź z chromem (Cu-Cr) – połączenie to zapewnia wysoką odporność na działanie łuku elektrycznego, dobre właściwości mechaniczne oraz wysoką przewodność elektryczną.

CC BY

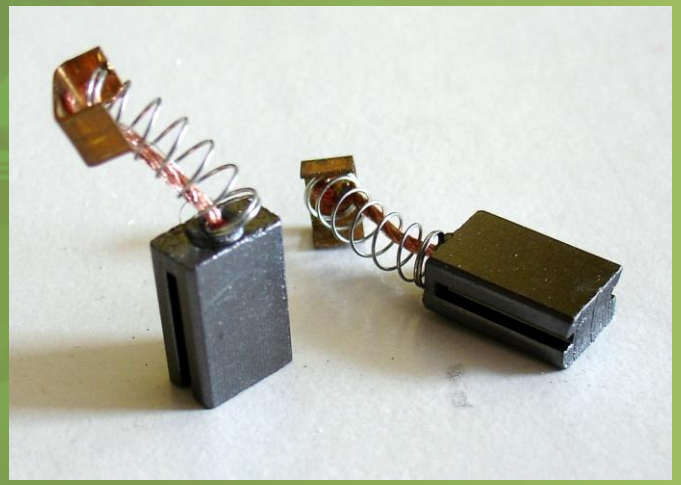
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

- Srebro z tlenkiem kadmu (Ag-CdO) – materiał ten charakteryzuje się wysoką odpornością na działanie łuku elektrycznego, dobrą przewodnością elektryczną oraz wysoką trwałością. Obecnie jest wycofywany ze stosowania ze względu na toksyczność kadmu.
- Srebro z tlenkiem cyny (Ag-SnO_2) przyjazna środowisku alternatywa dla Ag-CdO. Cechuje się niższą przewodnością elektryczną w porównaniu do Ag-CdO oraz wyższą ceną.
- Srebro z wolframem (AG-W) – materiał ten charakteryzuje się bardzo wysoką odpornością na działanie łuku elektrycznego przy dobrych właściwościach elektrycznych.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W miejscach, w których przepływ prądu elektrycznego musi być realizowany pomiędzy częścią ruchomą a nieruchomą urządzenia, do stworzenia zestyku wykorzystuje się **szczotki elektryczne**.

Szczotki są zazwyczaj stosowane w silnikach elektrycznych, gdzie współpracują z komutatorami lub pierścieniami ślizgowymi. Wykorzystuje się je również w urządzeniach takich jak autotransformatory i rezystory nastawne (potencjometry).



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Materiały na szczotki urządzeń elektrycznych muszą spełniać wszystkie wymagania stawiane stykom łączeniowym, a ponadto charakteryzować się niskim współczynnikiem tarcia, co pozwala ograniczyć straty mechaniczne i nagrzewanie się elementów ruchomych. Ma to szczególne znaczenie w urządzeniach takich jak silniki elektryczne.

Najczęściej stosowanym materiałem do produkcji szczotek jest grafit oraz jego mieszaniny z metalami. Przykładowe materiały na szczotki w urządzeniach elektrycznych:

- Grafit – charakteryzujący się dobrą przewodnością i niskim współczynnikiem tarcia.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

- Elektrografit – ulepszony grafit, który dodatkowo może być impregnowany substancjami, takimi jak żywice, w celu poprawy właściwości mechanicznych i elektrycznych.

Kompozyty metalo-grafitowe np.:

- Srebro-grafit – łączy doskonałą przewodność srebra z dobrymi właściwościami mechanicznymi grafitu.
- Miedź-grafit – oferuje połączenie wysokiej przewodności miedzi z odpornością na zużycie, jaką zapewnia grafit.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Innym sposobem wykorzystania odmiennych właściwości różnych materiałów zestykowych bez ich łączenia w stopy i spieki jest wykonywanie tzw. styków zespolonych (zespołowych). W takiej konstrukcji wykorzystuje się dwa różne zestyki wykonane z różnych materiałów. Przykładem może być zestyk zespolony, w którym styki robocze są wykonane np. ze srebra, a styki opalne – z wolframu.

W stanie gdy styki są zamknięte przepływ prądu elektrycznego realizowany jest przez zestyk roboczy z materiału o wysokiej przewodności.

W momencie otwierania lub zamykania styków przepływ prądu odbywa się przez styki opalne, które są odporne na erozję. łukową.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

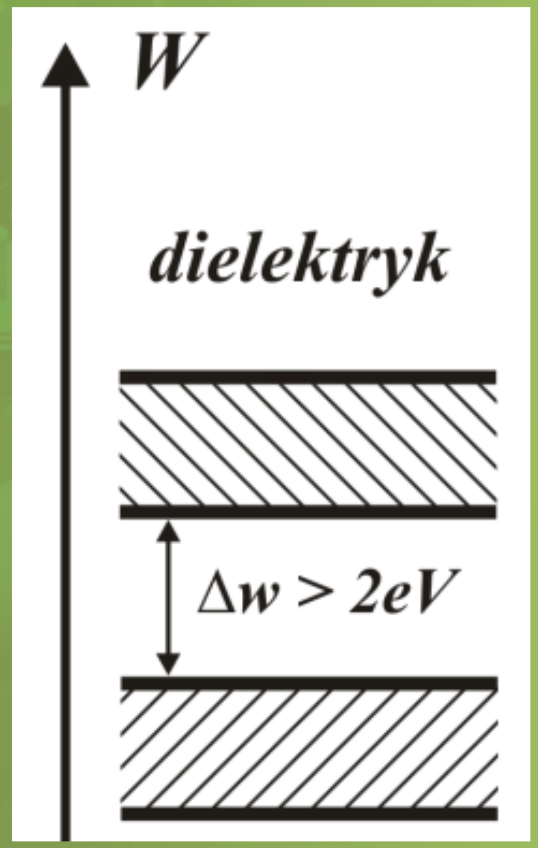
Polaryzacja dielektryków.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Dielektrykami nazywamy ciała stałe, ciecze i gazy, które przy braku zewnętrznych czynników jonizujących nie posiadają w swojej strukturze swobodnych nośników ładunku elektrycznego. Materiały te charakteryzują się niską konduktywnością, a co za tym idzie słabo przewodzą prąd elektryczny. Z perspektywy modelu pasmowego materii posiadają one pomiędzy całkowicie zapełnionym pasmem walencyjnym oraz pozbawiony elektronów pasmem przewodnictwa pasmo zabronione, którego szerokość zazwyczaj przekracza 2 eV.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przykładami dielektryków stałych są; szkło, ceramika, guma, tworzywa sztuczne takie jak polichlorek winylu (PVC), politetrafluoroetylen (teflon), polietylen (PE), poliamidy (np. nylon), impregnowana celuloza.

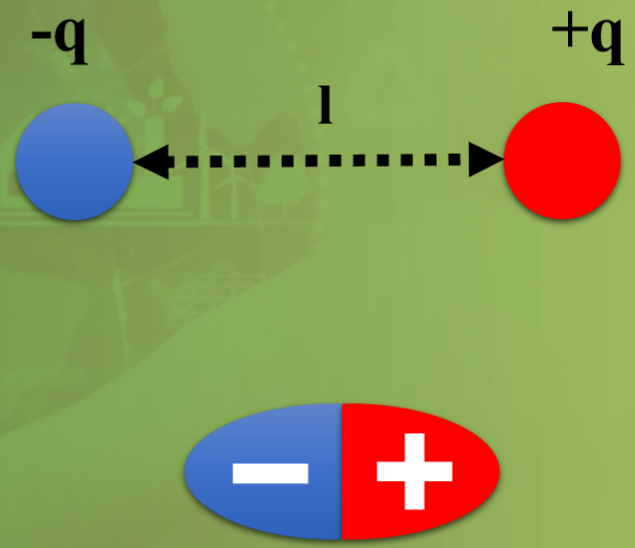
Przykładami dielektryków ciekłych są; mineralny olej transformatorowy, estrowe oleje transformatorowe, oleje sylikonowe, wycofane ze względu na swoją toksyczność oleje PCB, woda destylowana.

Przykładami dielektryków gazowych są; powietrze, azot (N_2), dwutlenek węgla (CO_2), sześciofluorek siarki (SF_6), argon (Ar), hel (He), ksenon (Xe).

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W dielektrykach dochodzi do zjawiska polaryzacji, które polega na powstawaniu dipoli elektrycznych lub orientacji już istniejących dipoli pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego.

Dipolem elektrycznym nazywamy dwa związane ze sobą ładunki elektryczne o tej samej wartości ładunku *q* i przeciwnych znakach, oddalone od siebie na odległość *l*.



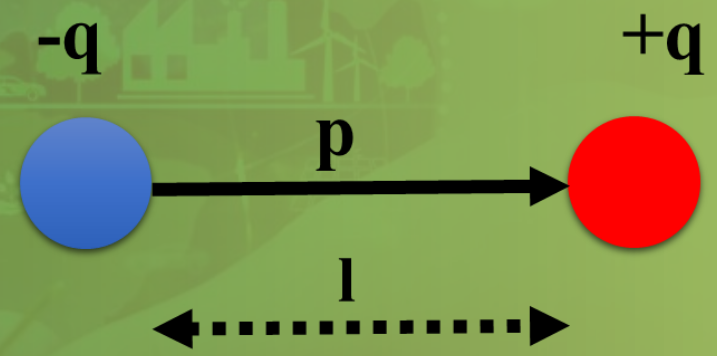
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Elektryczny moment dipolowy p jest wektorem skierowanym od ładunku ujemnego dipola do ładunku dodatniego dipola, który charakteryzuje dipol. Określamy go jako:

$$\boldsymbol{p} = q \cdot \boldsymbol{l}, [C \cdot m]$$

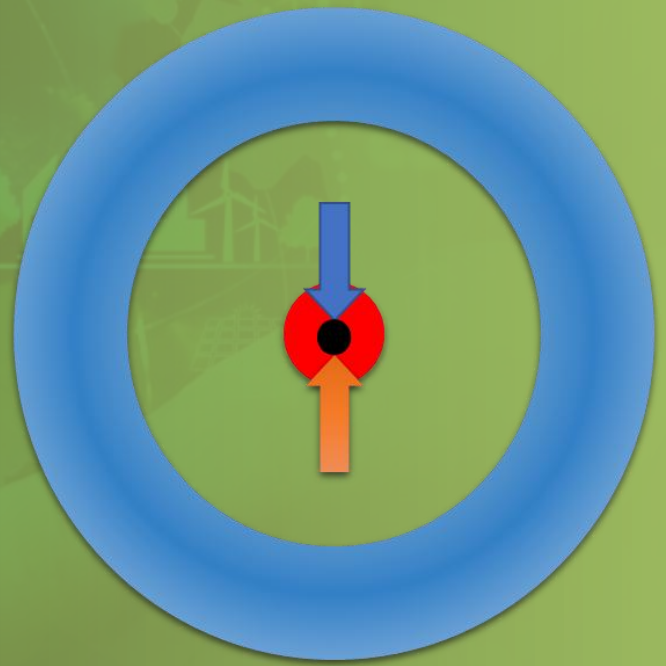
Można go interpretować jako miarę oddzielenia od siebie ładunków różnoimiennych w układzie. Wpływa on na zachowanie cząsteczek w polu elektrycznym np. na ustawianie się momentów dipoli zgodnie z liniami pola elektrycznego.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W atomie ładunek ujemny jest zlokalizowany w chmurze elektronowej otaczającej jądro atomowe. Jeśli wyznaczymy środek ciężkości ładunków ujemnych, będzie on pokrywał się ze środkiem ciężkości całego atomu.

Ładunek dodatni skumulowany jest w jądrze atomu. Również w tym przypadku środek ciężkości ładunków dodatnich pokrywa się ze środkiem ciężkości atomu.

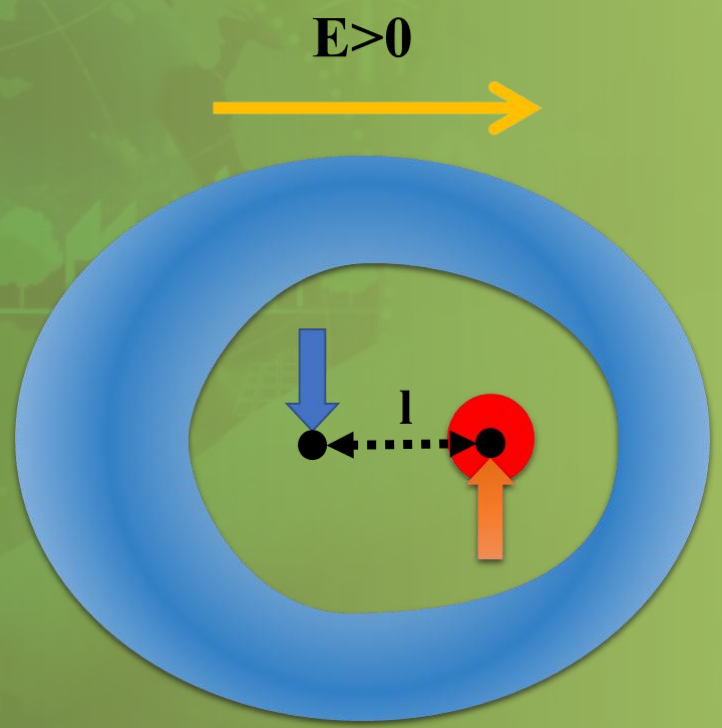


CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego następuje przesunięcie chmury elektronowej względem położenia jądra atomowego. Skutkiem działania zewnętrznego pola elektrycznego jest rozsunięcie się punktów wypadkowych środków ciężkości dodatnich i ujemnych ładunków elektrycznych. Atom staje się dipolem. Tego typu polaryzację nazywamy **polaryzacją elektronową.**



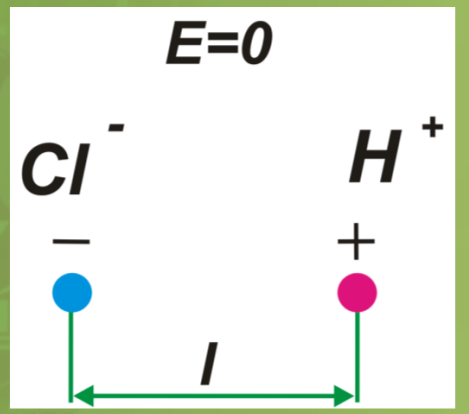
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

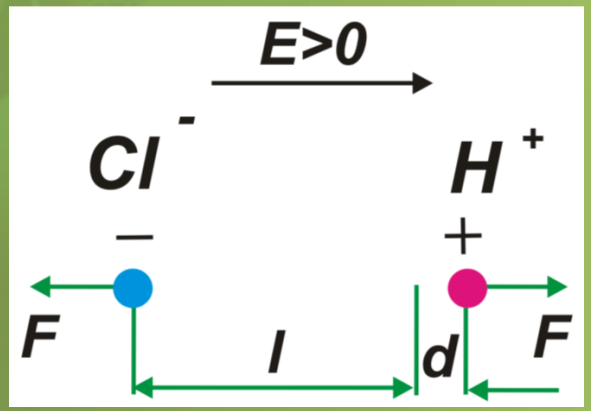
Cechy polaryzacji elektronowej:

- występuje we wszystkich dielektrykach
- zachodzi bardzo szybko ok. 10^{-15} s
- odkształcenia powłok elektronowych są w pełni sprężyste
- proces polaryzacji nie powoduje strat w postaci ciepła
- po zaniku zewnętrznego pola elektrycznego dipol zanika
- nie jest zależna od temperatury

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jeżeli dany materiał jest zbudowany z jonów, które mają regularne ułożenie (np. w przypadku ciała krystalicznego o strukturze jonowej), to pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego dochodzi do wzajemnego przesunięcia się jonów dodatnich i ujemnych względem ich równowagowych położeń. Przesunięcie to powoduje zaindukowanie momentu dipolowego. Tego typu polaryzację nazywamy **polaryzacją jonową.**





CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

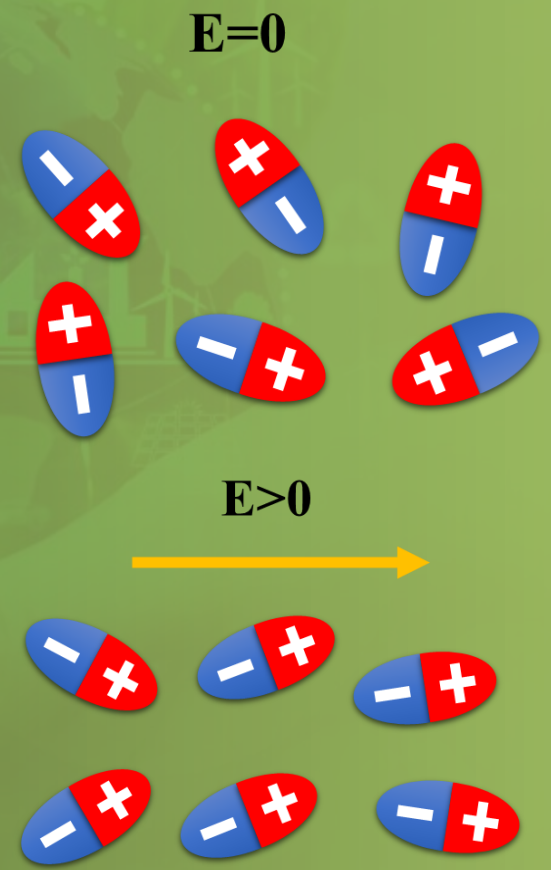
Cechy polaryzacji jonowej:

- występuje w materiałach jonowych, np. NaCl, $PaTiO_3$, MgO
- zachodzi bardzo szybko ok. 10^{-13} s
- przesunięcia jonów są w pełni sprężyste
- proces polaryzacji jonowej nie powoduje strat w postaci ciepła
- po zaniku zewnętrznego pola elektrycznego dipol zanika
- jest zależna od temperatury

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W materiałach, w których występują trwałe momenty dipolowe (np. w cząsteczkach polarnych, takich jak woda), ze względu na drgania cieplne orientacja cząsteczek, a co za tym idzie, momentów dipolowych, jest chaotyczna. Pod wpływem działania pola elektrycznego cząsteczki orientują się w taki sposób, aby ich momenty dipolowe były równoległe do linii pola elektrycznego. Tego typu polaryzację nazywamy **polaryzacją dipolową (orientacji).**



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

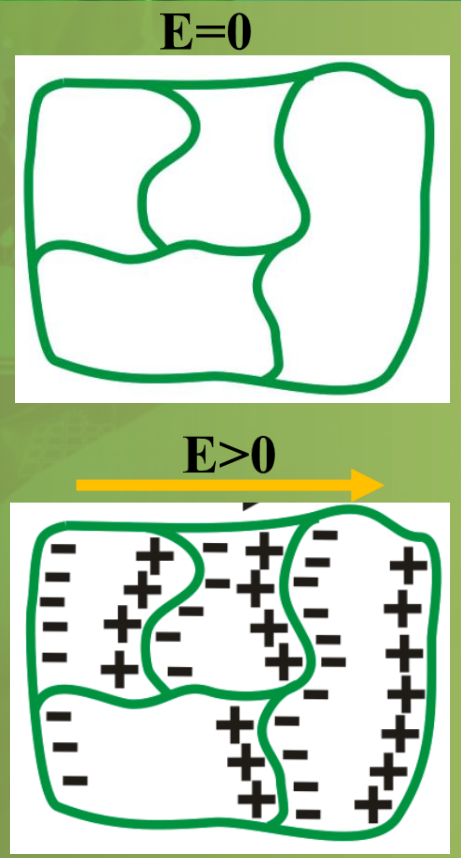
Cechy polaryzacji dipolowej:

- występuje w substancjach o polarnych cząsteczkach np. woda, HCl, NH_3
- czas trwania polaryzacji od 10^{-10} s do 10^{-2} s
- dla danej temperatury przy danym natężeniu pola elektrycznego ustala się równowaga pomiędzy porządkującymi procesami polaryzacji a chaotycznymi ruchami cieplnymi
- skutkiem polaryzacji dipolowej w zmiennym polu elektrycznym jest wystąpienie strat energii w formie ciepła

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jeżeli w materiale znajduje się pewna ilość swobodnych nośników, mogą one przemieszczać się pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. W momencie, gdy napotykają barierę w formie granicy faz materiału, ładunki zatrzymują się na niej, co prowadzi do powstania polaryzacji. Ten typ polaryzacji nazywany jest **polaryzacją makroskopową (międzyfazową)** i zachodzi głównie w materiałach o złożonej budowie.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Cechy polaryzacji makroskopowej:

- występuje w materiałach o złożonej wielofazowej strukturze takich jak kompozyty, ciała porowate lub dielektryki polikrystaliczne
- wzrost temperatury może prowadzić do zwiększenia mobilności nośników, czego skutkiem jest wzmocnienie polaryzacji makroskopowej
- zachodzi bardzo wolno, czas jej trwania to milisekundy do nawet godzin
- po usunięciu zewnętrznego pola elektrycznego ładunki zgormadzone na granicach faz wracają do równomiernego rozłożenia a polaryzacja zanika

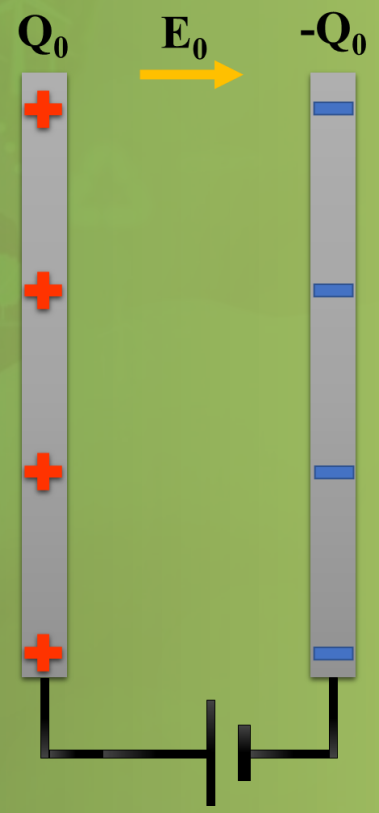
CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jeżeli do kondensatora próżniowego (w którym dielektrykiem pomiędzy okładkami jest próżnia) przyłożymy napięcie elektryczne, na okładkach kondensatora pojawi się ładunek elektryczny. Miarą zdolności kondensatora do gromadzenia ładunku jest jego pojemność elektryczna, określona wzorem:

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \left[F = \frac{Q}{V}\right]$$

Gdzie: C_0 - pojemność kondensatora próżniowego, ε_0 - przenikalność elektryczna próżni, S – pole powierzchni okładek, d – odległość między okładkami.

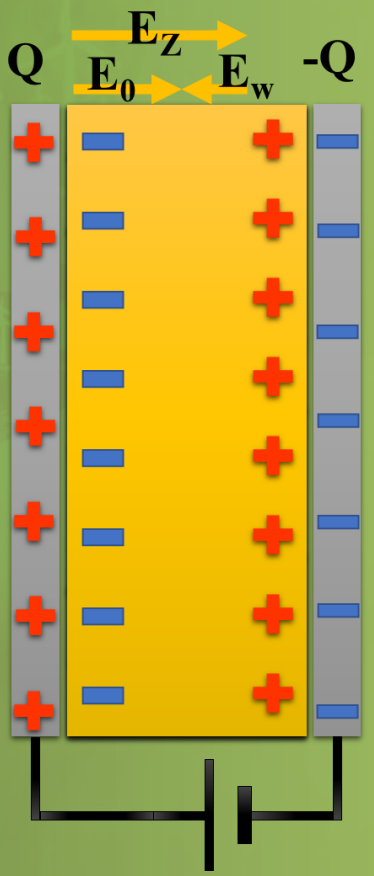


CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jeżeli pomiędzy okładkami kondensatora umieścimy dielektryk, to pod wpływem występującego pomiędzy okładkami pola elektrycznego dojdzie do spolaryzowania dielektryka. Skutkiem tego będzie pojawienie się ładunku elektrycznego na powierzchni dielektryka. Obecność tego dodatkowego ładunku spowoduje zwiększenie pojemności kondensatora.

$$C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \left[F = \frac{Q}{V}\right]$$

Gdzie: ε_r - przenikalność względna dielektryka



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Względna przenikalność elektryczna ε_r różnych materiałów

Dielektryki lotne		Dielektryki ciekłe		Dielektryki stałe	
Powietrze	1.000590	Woda destylowana	≈ 81	Polietylen	≈2.25
Tlen	1.000547	Olej mineralny	2.2-2.3	Polichlorek winylu	3 - 4
Wodór	1.000270	Ester syntetyczny	3.2	Tytanian baru	1000 - 10000
Azot	1.000606	Ester naturalny	3.1 - 3.5	Ceramika	10 - 100
Sześciofluorek siarki	1.002-1.003	Bio olej mineralny	≈ 1.9	Izolacja papierowo-olejowa	≈ 4.4

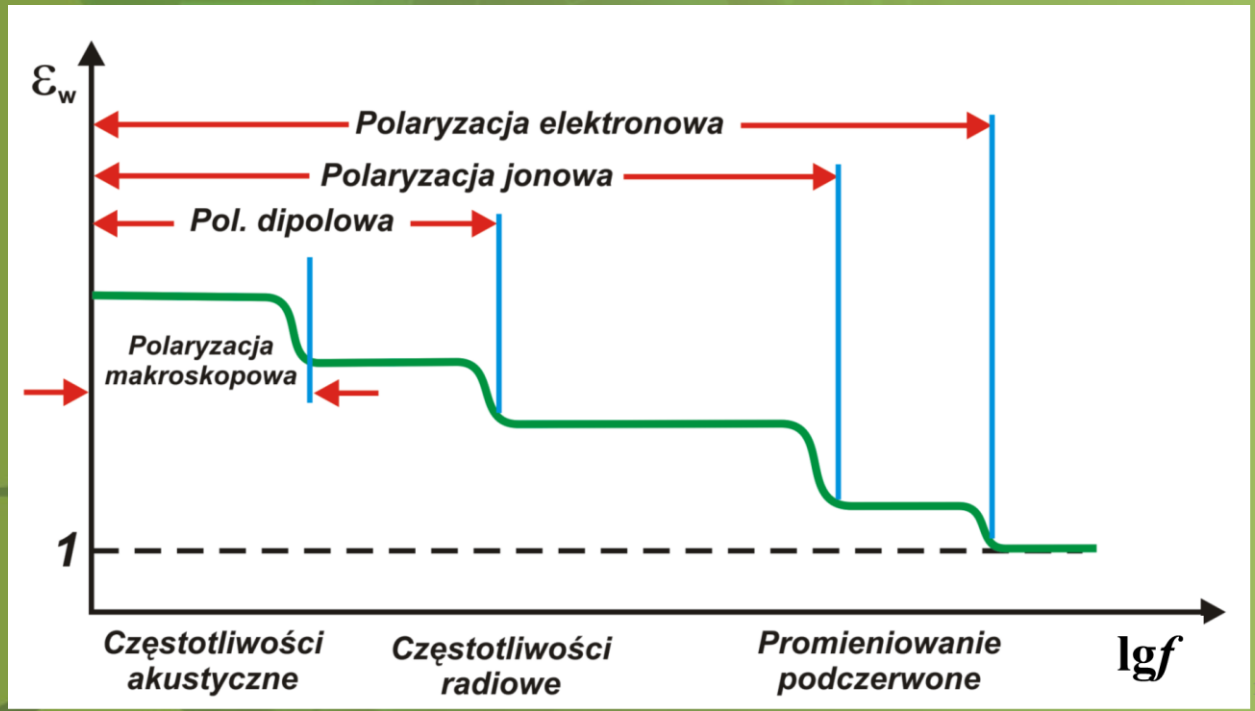
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Częstotliwość napięcia przyłożonego do dielektryka (a co za tym idzie, pola elektrycznego) ma istotny wpływ na zdolność materiału do polaryzacji. Każdy z mechanizmów polaryzacji potrzebuje określonego czasu, aby polaryzacja mogła wystąpić. Zbyt szybkie zmiany pola elektrycznego mogą uniemożliwić występowanie niektórych mechanizmów polaryzacji. Wraz ze wzrostem częstotliwości zmniejsza się efektywność mechanizmów wymagających dłuższego czasu reakcji, takich jak polaryzacja dipolowa czy jonowa. Skutkiem tego jest spadek wartości względnej przenikalności elektrycznej materiału po przekroczeniu charakterystycznych dla danego materiału wartości częstotliwości pola elektrycznego.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Rysunek przedstawia zmiany względnej przenikalności elektrycznej dielektryka w funkcji częstotliwości. Za pomocą strzałek oznaczono zakresy częstotliwości, dla których występują poszczególne typy polaryzacji tj. makroskopowa, dipolowa, jonowa i elektronowa.



CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

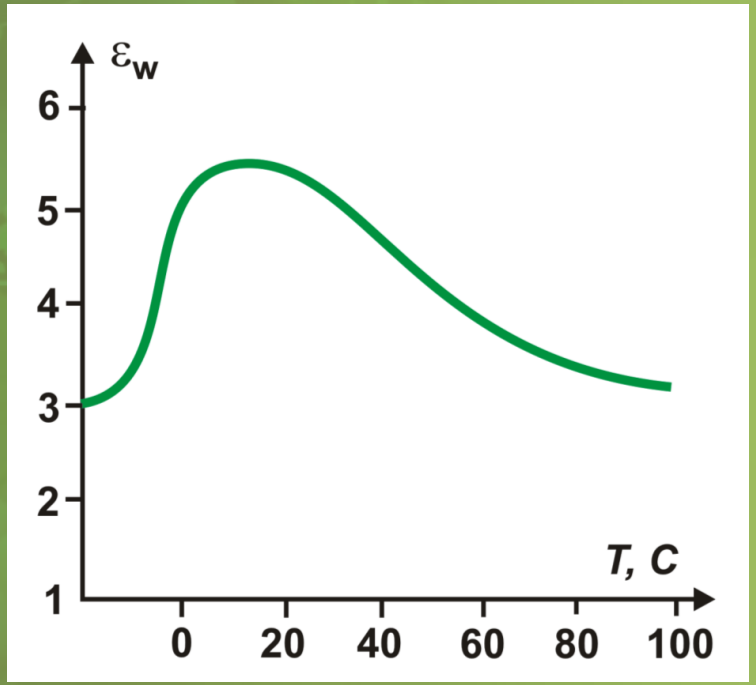
Temperatura ma złożony wpływ na zdolność materiału do polaryzacji. W przypadku ogólnym wzrost temperatury prowadzi do osłabienia zjawisk polaryzacyjnych, ze względu na ciągłe ustalanie się równowagi pomiędzy porządkującymi siłami pola elektrycznego a chaotycznymi siłami ruchów cieplnych. Zjawisko to dotyczy w szczególności polaryzacji dipolowej (orientacyjnej). W polaryzacji jonowej umiarkowany wzrost temperatury zwiększa mobilność jonów, co sprzyja polaryzacji, ale dalszy wzrost temperatury prowadzi do jej osłabienia. Jedynym mechanizmem polaryzacji, który jest niezależny od temperatury, jest polaryzacja elektronowa. Wiele materiałów wykazuje indywidualny przebieg polaryzacji w funkcji temperatury.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

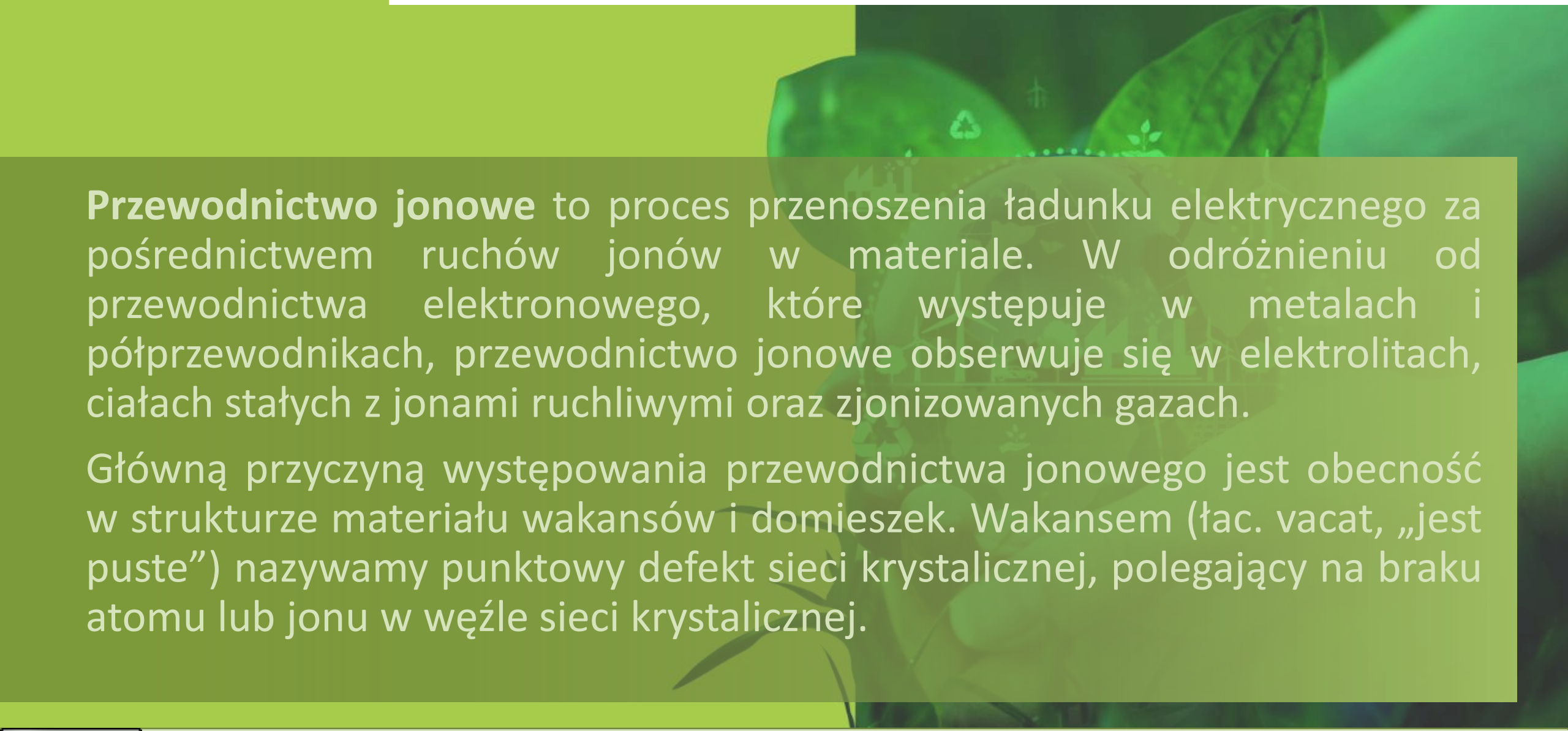
Indywidualny przebieg zmian przenikalności względnej w funkcji temperatury można obserwować w polarnych dielektrykach ciekłych np. oleju mineralnym.

W niskich temperaturach wysoka lepkość oleju utrudnia orientację dipoli. Wraz ze wzrostem temperatury lepkość maleje co ułatwia zachodzenie procesu polaryzacji. Przy dalszym wzroście temperatury nasilają się chaotyczne ruchy cieplne, które utrudniają orientację dipoli.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

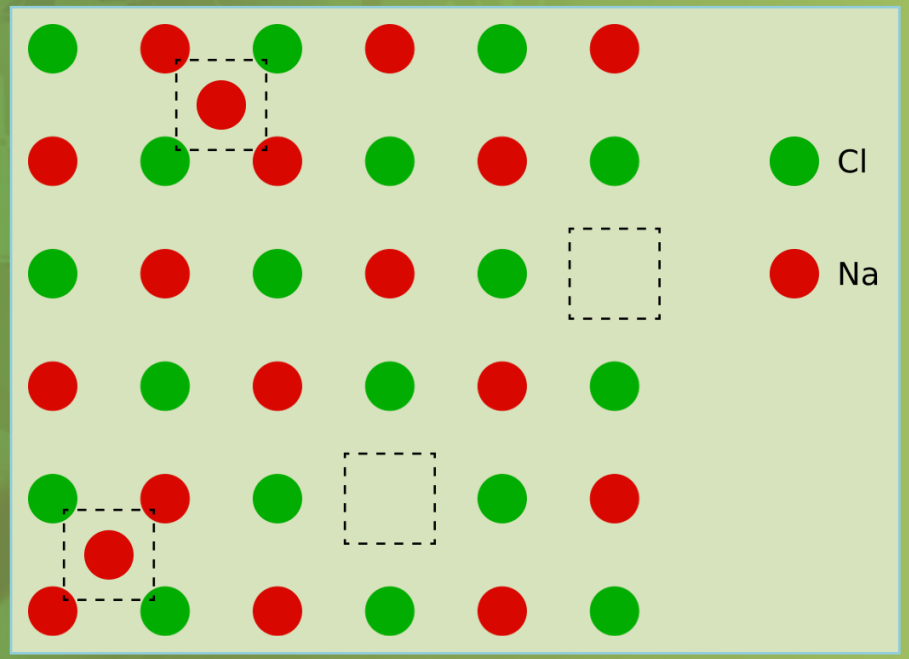


Przewodnictwo jonowe to proces przenoszenia ładunku elektrycznego za pośrednictwem ruchów jonów w materiale. W odróżnieniu od przewodnictwa elektronowego, które występuje w metalach i półprzewodnikach, przewodnictwo jonowe obserwuje się w elektrolitach, ciałach stałych z jonami ruchliwymi oraz zjonizowanych gazach.

Główną przyczyną występowania przewodnictwa jonowego jest obecność w strukturze materiału wakansów i domieszek. Wakansem (łac. vacat, „jest puste”) nazywamy punktowy defekt sieci krystalicznej, polegający na braku atomu lub jonu w węźle sieci krystalicznej.

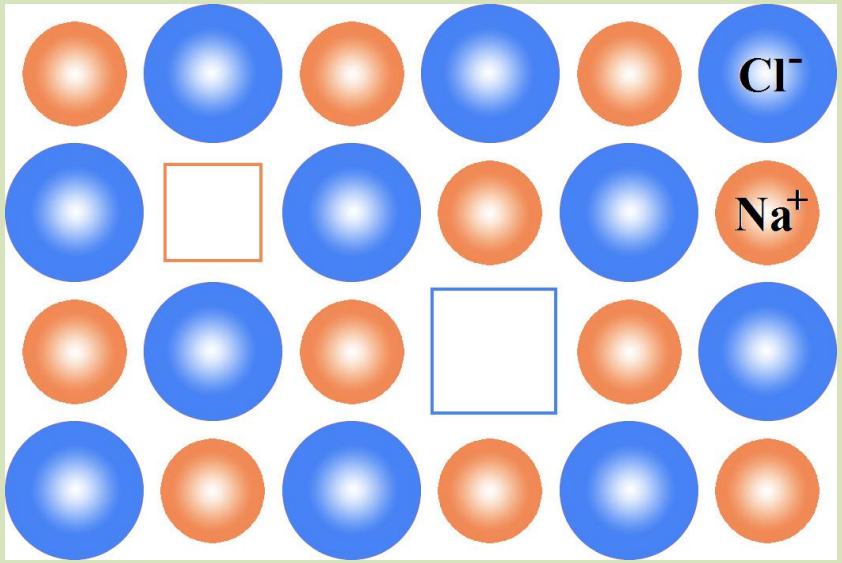
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jednym z rodzajów wakansów, które mogą wystąpić w sieci krystalicznej, jest **defekt Frenkla**. Powstaje on w wyniku przemieszczenia się jonu z jego pierwotnej pozycji w węźle sieci krystalicznej do pozycji międzywęzłowej. Zazwyczaj mniejszy jon, najczęściej kation, zajmuje przestrzeń międzywęzłową. Mobilność takiego kationu jest większa niż jonu znajdującego się w węźle sieci krystalicznej, co wpływa na wzrost konduktywności materiału.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Innym rodzajem wakansu jest **defekt Schottky'ego**. Powstaje on w wyniku dyfuzji jonów przez przestrzeń międzywęzłową w kierunku powierzchni kryształu. Skutkiem tego procesu jest tworzenie na powierzchni kryształu warstwy złożonej z jonów, co prowadzi do zmniejszenia gęstości materiału. Zjawisko to występuje zazwyczaj w materiałach, w których kationy i aniony mają porównywalne rozmiary.

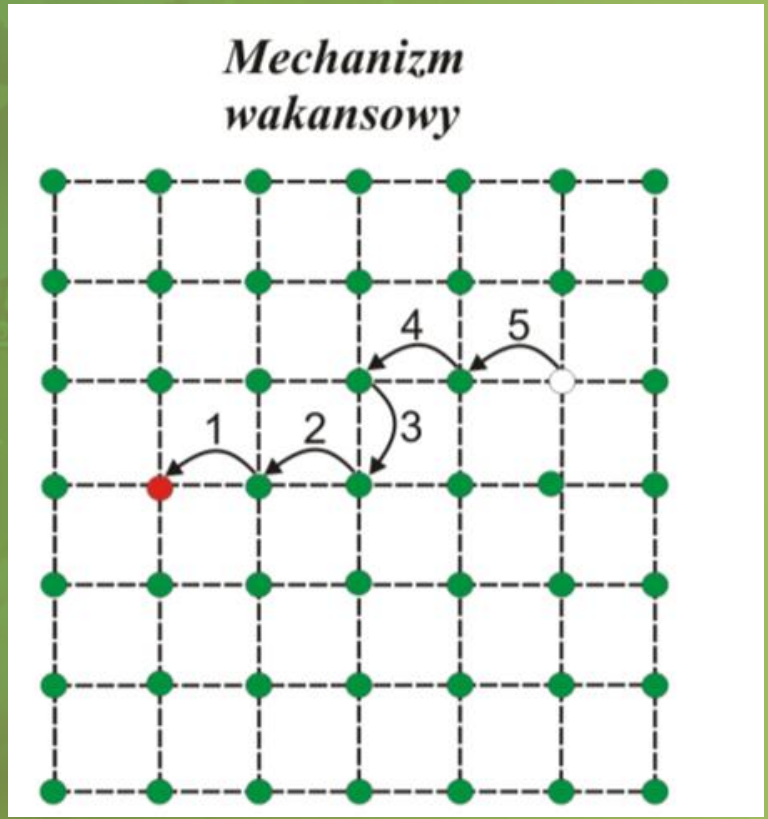


CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

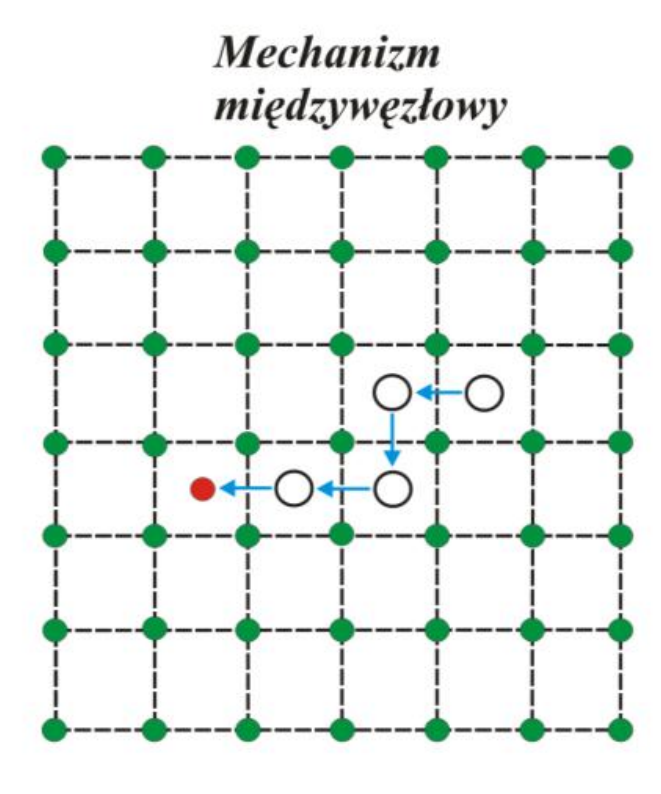
Rozróżniamy co najmniej trzy mechanizmy dyfuzji jonów w objętości kryształu (tzw. dyfuzja objętościowa).

W **mechanizmie wakansowym** następują przeskoki atomów lub jonów z ich pozycji węzłowej do pozycji sąsiadującego wakansu. Przeskakujący jon pozostawia po sobie wakans, w który może przemieścić się kolejny jon, tworząc w ten sposób ciągły proces migracji wakansów.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W **mechanizmie międzywęzłowym** atom przemieszcza się, przechodząc z jednej przestrzeni międzywęzłowej do kolejnej. Kluczowe znaczenie dla wystąpienia tego mechanizmu ma niewielki rozmiar jonów, które mogą swobodnie przemieszczać się w przestrzeniach międzywęzłowych. Sprzyjającym czynnikiem dla tego typu mechanizmu jest obecność stosunkowo dużych przestrzeni pomiędzy węzłami sieci krystalicznej, co umożliwia łatwiejsze przemieszczanie się jonów.

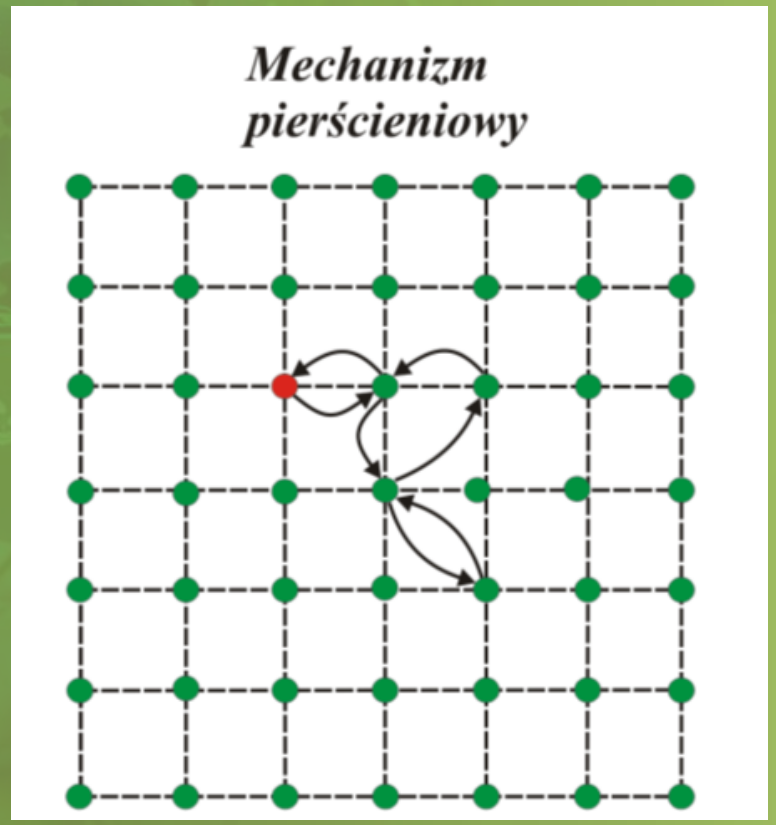


CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Mechanizm pierścieniowy polega na kolektywnym przemieszczaniu się grup atomów. Przemieszczenie jednego atomu powoduje jednoczesne przemieszczenie pozostałych atomów w pierścieniu na kolejne pozycje. W tym mechanizmie nie jest wymagana obecność wakansów ani przechodzenie jonów do pozycji międzywęzłowych, co odróżnia go od innych mechanizmów dyfuzji.



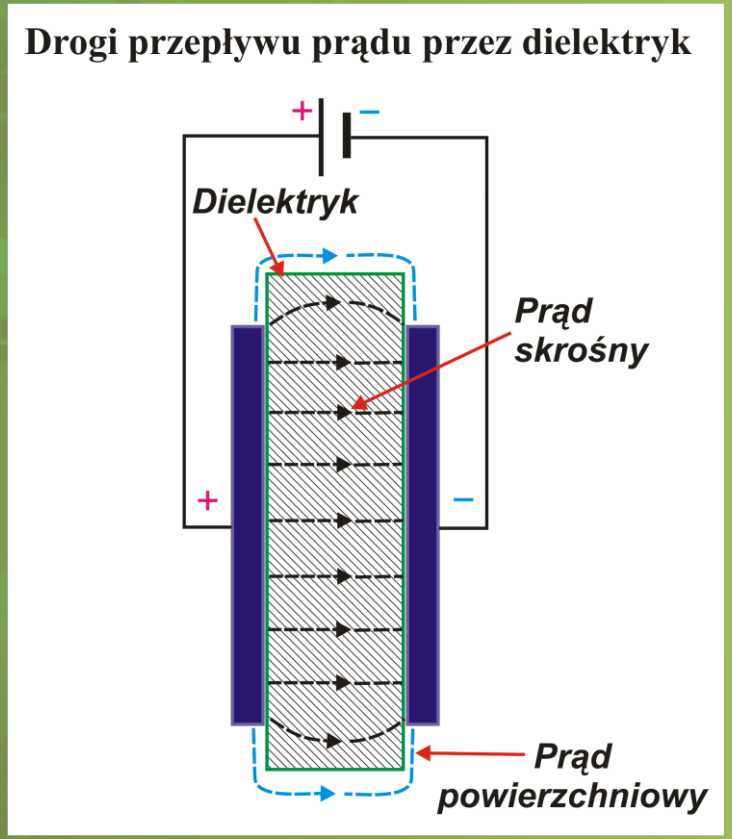
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego przez dielektryk przepływa prąd elektryczny o niewielkim natężeniu, nazywany **prądem upływu.**

Prąd upływu składa się z dwóch komponentów:

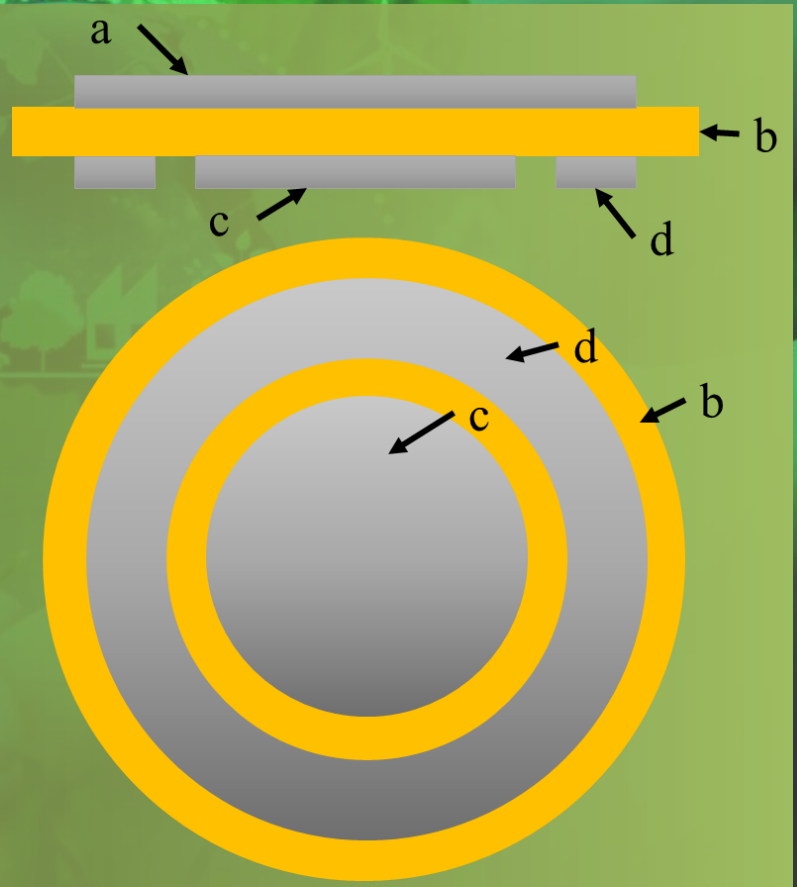
- Składowej skrośnej, przepływającej przez objętość dielektryka.
- Składowej powierzchniowej, płynącej po powierzchni dielektryka.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

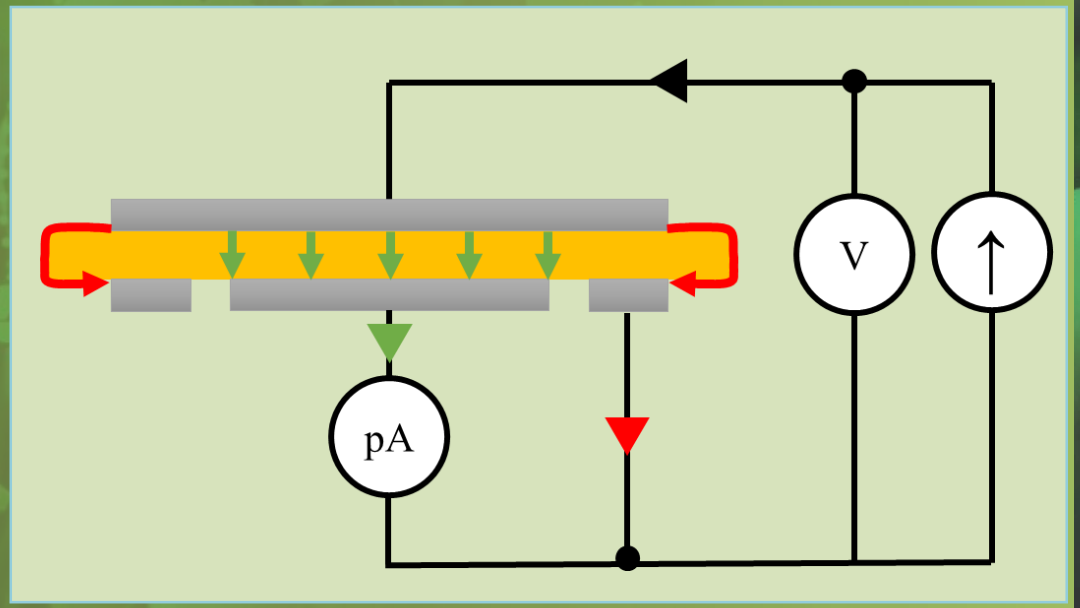
Do pomiarów parametrów elektrycznych dielektryków stałych stosowany jest trójelektrodowy kondensator pomiarowy. Składa się on z elektrody napięciowej (a), elektrody pomiarowej (c), elektrody ochronnej (ekranującej) oraz badanej próbki (b). Dzięki odpowiedniej konfiguracji układu pomiarowego za pomocą tego rodzaju kondensatora można określić wartości składowych prądu upływu, które służą do wyznaczenia rezystywności.



CC BY

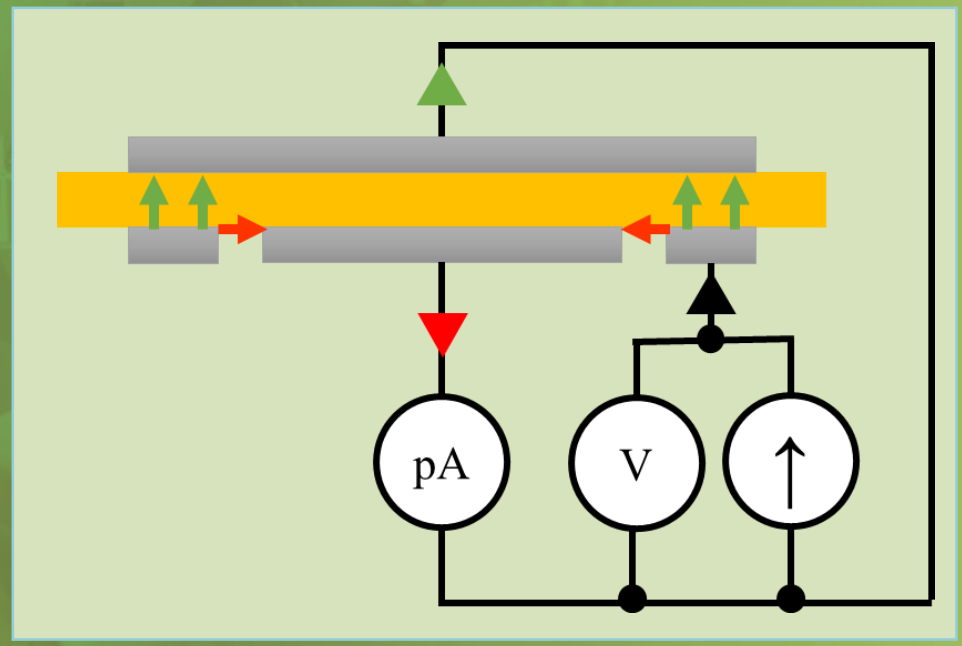
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W przypadku pomiaru **rezystywności skrośnej** ρ_V napięcie pomiarowe przykładane jest do elektrody napięciowej. Prąd skrośny przepływa przez próbkę znajdującą się pomiędzy elektrodą napięciową a pomiarową i jest mierzony za pomocą pikoamperomierza. Prąd składowej powierzchniowej wychwytywany jest przez elektrodę ochronną i nie wpływa na pomiar.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przy pomiarze **rezystywności powierzchniowej** ρ_S napięcie pomiarowe przykładane jest do elektrody ochronnej. Prąd powierzchniowy przepływa po powierzchni próbki znajdującej się pomiędzy elektrodą ochronną a pomiarową i jest mierzony za pomocą pikoamperomierza. Prąd składowej skrośnej jest wychwytywany przez elektrodę napięciową i nie wpływa na wynik pomiaru.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Straty w dielektrykach.

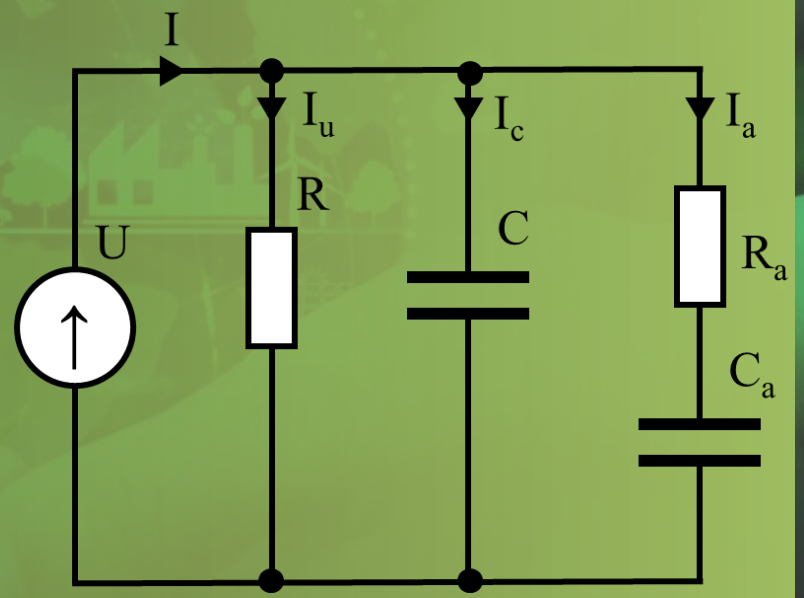
CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Podstawowy schemat zastępczy dielektryka składa się z trzech równoległych gałęzi. Gałąź pierwsza zawiera rezystancję R, która jest związana ze stratami przewodzenia dielektryka. Gałąź druga zawiera pojemność C, reprezentującą polaryzację elektronową i jonową, a także pojemność geometryczną dielektryka. Gałąź trzecia, zwana absorpcyjną, składa się z pojemności C_a, reprezentującej polaryzację dipolową oraz rezystancji R_a, która odpowiada za straty polaryzacyjne.

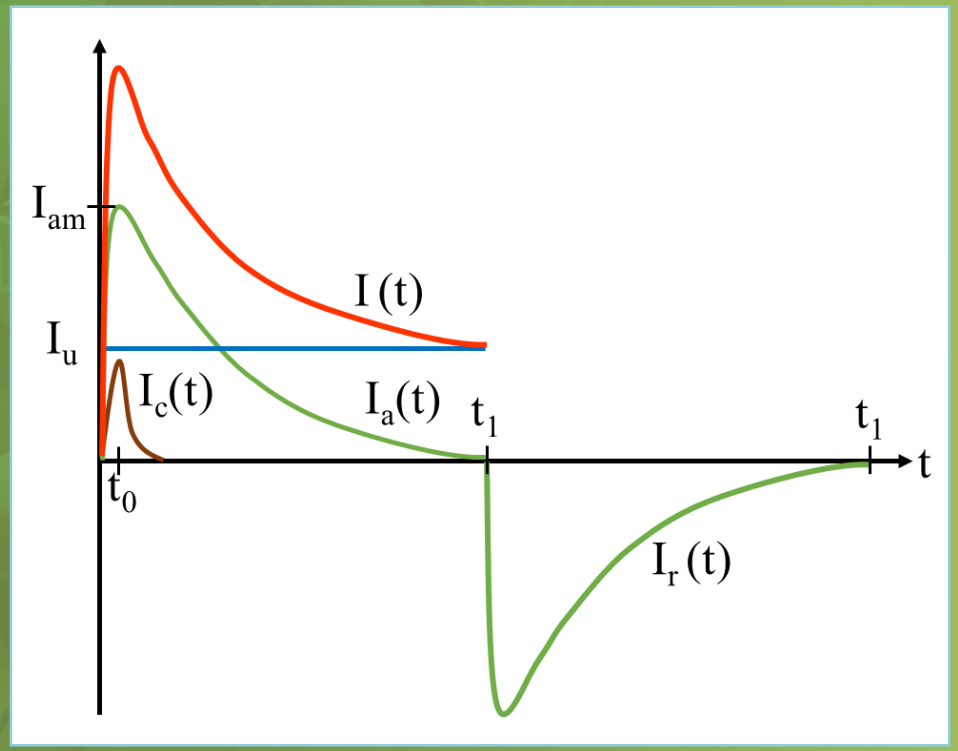


CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Po przyłożeniu do dielektryka napięcia stałego płynie przez niego prąd I składający się z sumy trzech prądów:

$$I(t) = I_c(t) + I_u(t) + I_a(t)$$

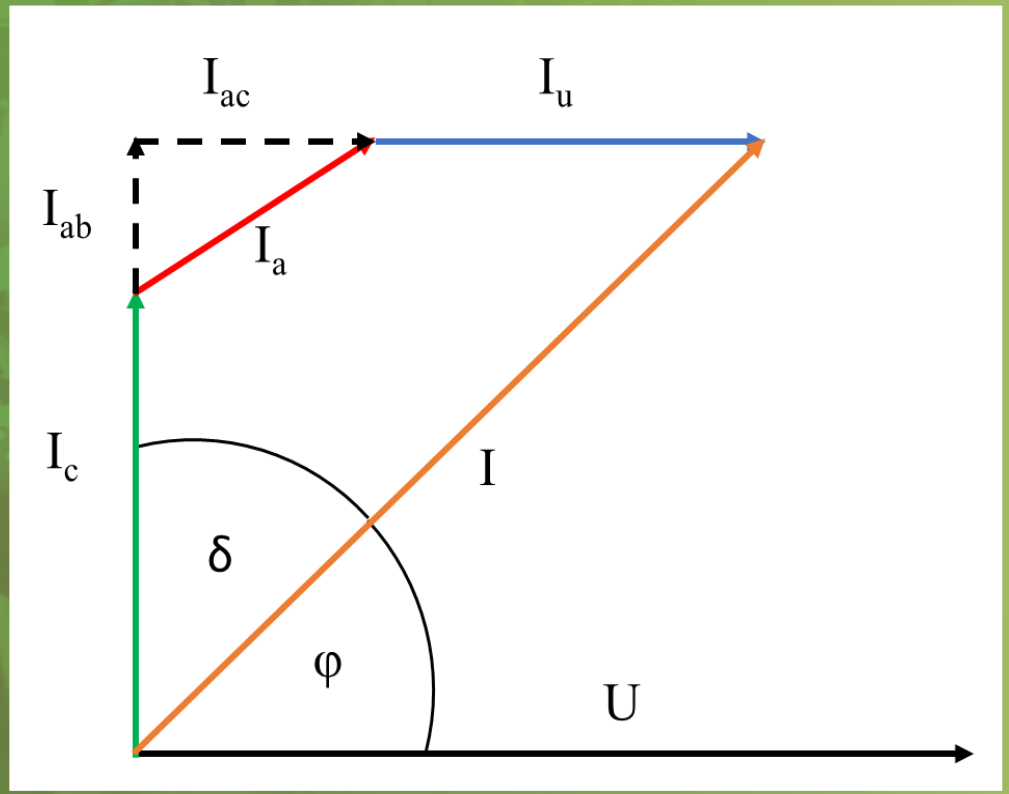
I_c – prąd ładowania, który związany jest z polaryzacją elektronową i jonową dielektryka, I_a – prąd absorbcji, który związany jest z polaryzacją dipolową występującą w dielektryku, I_u – prąd przewodnictwa, który związany jest z konduktywnością dielektryka



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W przypadku prądu przemiennego natężenie prądu *I* płynącego przez dielektryk jest przesunięte w fazie o kąt φ w stosunku do napięcia zasilającego. Kąt będący dopełnieniem kąta φ do 90 nazywamy kątem stratności dielektrycznej δ:

$$\delta = 90 - \alpha$$



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Współczynnikiem strat dielektrycznych ($tg\delta$) nazywamy stosunek natężenia prądów o charakterze czynnym I_C (wywołujących straty w postaci ciepła) do natężenia prądów o charakterze biernym I_B (związanymi z bezstratnymi zjawiskami polaryzacyjnymi):

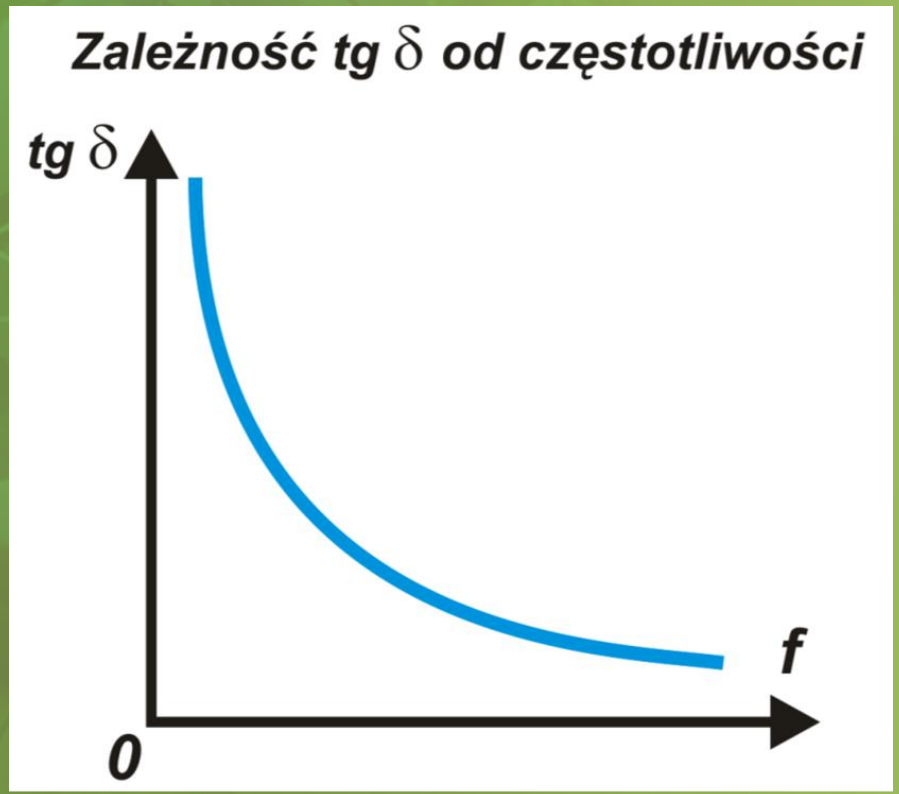
$$tg\delta = \frac{I_u + I_{ac}}{I_C + I_{ab}} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C U}{I_B U} = \frac{P}{Q}$$

Gdzie: I_{ab} - składowa bierna prądu absorbcji, I_{ac} - składowa czynna prądu absorbcji, P – moc czynna, Q – moc bierna.

W praktyce $tg\delta$ można interpretować jako współczynnik opisujący jak duża część energii pola elektrycznego zostanie zmieniona w straty cieplne.

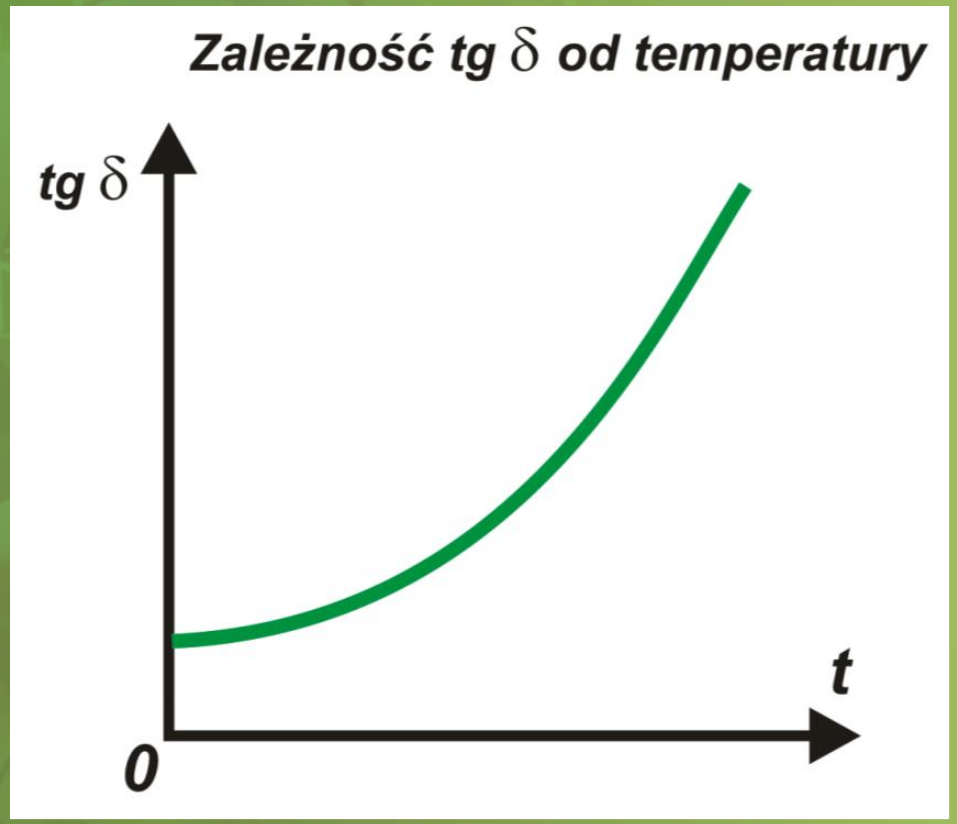
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W przypadku dielektryków niepolarnych, tj. takich, w których występuje jedynie bezstratna polaryzacja elektronowa i jonowa, wraz ze wzrostem częstotliwości maleje wartość tgδ. Jest to związane ze wzrostem składowej biernej (pojemnościowej) prądu płynącego przez dielektryk, co zmniejsza udział strat rezystancyjnych w całkowitym prądzie.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

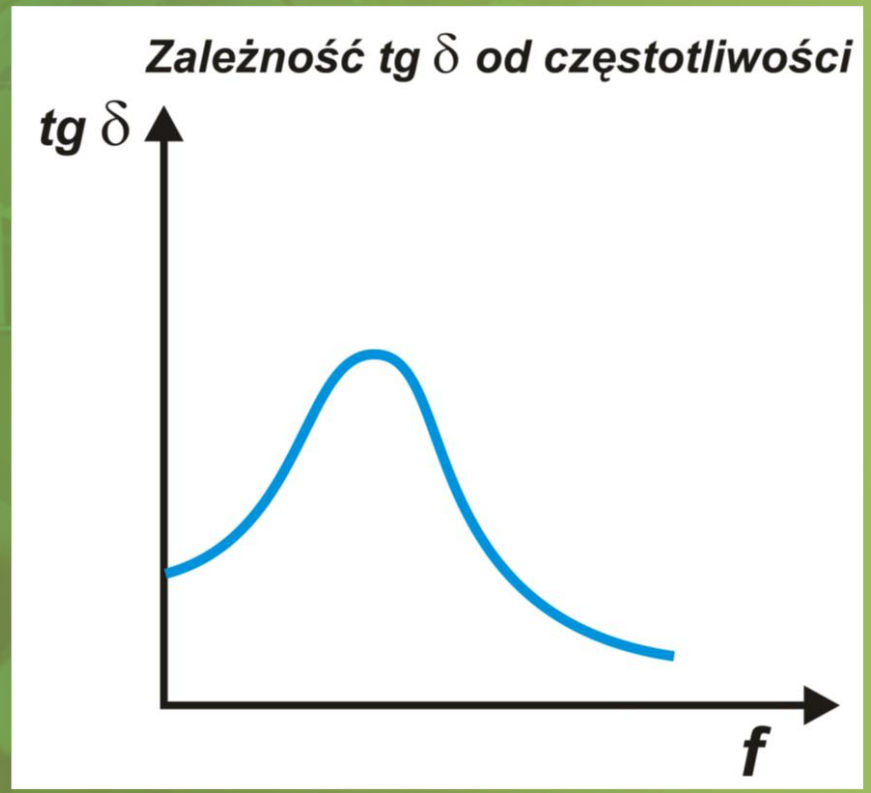
W raz ze wzrostem temperatury dielektryka niepolarnego maleje rezystywność dielektryka czego skutkiem jest wzrost natężenia prądu o charakterze czynnym. Prowadzi to do wzrostu wartości współczynnika strat dielektrycznych w funkcji temperatury materiału.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

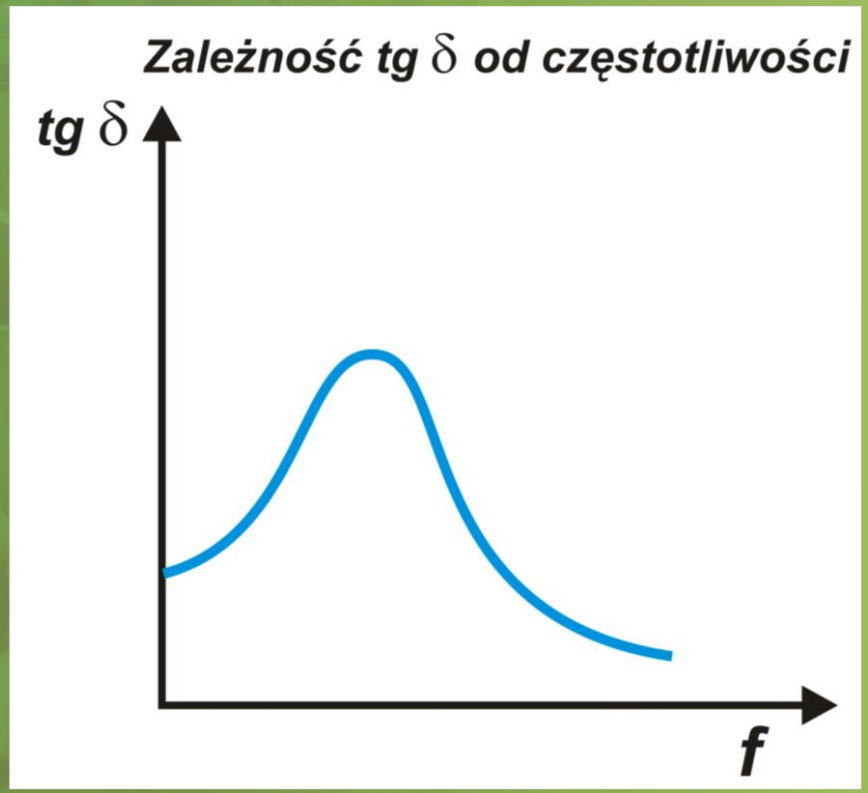
Zależność tangensa strat dielektrycznych (tgδ) w funkcji częstotliwości dla dielektryka polarnego, w którym występują stratne polaryzacje orientacyjne, jest bardziej złożona. Początkowo, wraz ze wzrostem częstotliwości, straty dielektryczne rosną. Wynika to z coraz większej liczby cykli reorientacji dipoli na jednostkę czasu. Przy dalszym wzroście częstotliwości tgδ osiąga maksimum, a następnie zaczyna maleć.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

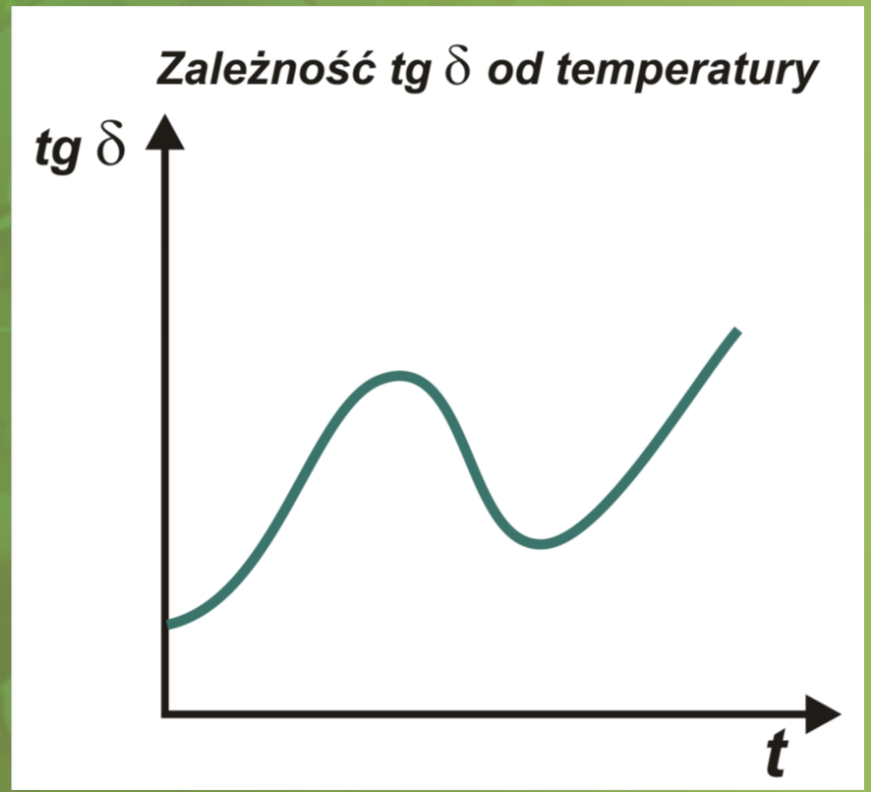
Spadek wartości tgδ wraz ze wzrostem częstotliwości jest spowodowany tym, że dipole przestają nadążać ze swoją orientacją za coraz szybszymi zmianami pola elektrycznego. Dla odpowiednio wysokich częstotliwości polaryzacja dipolowa zanika. Pozostają aktywne jedynie bezstratne mechanizmy polaryzacji, takie jak polaryzacja elektronowa i polaryzacja jonowa.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

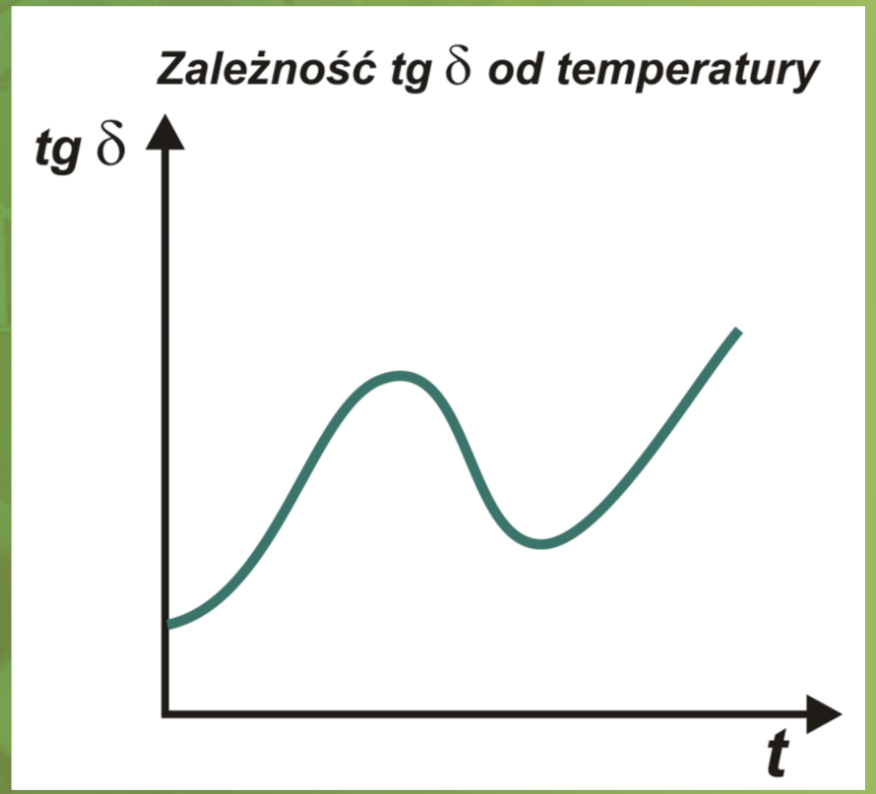
Zależność współczynnika strat dielektrycznych dielektryków polarnych w funkcji temperatury może mieć złożony przebieg. Przykładem są polarne oleje transformatorowe. W zakresie niskich temperatur, wraz ze wzrostem temperatury, lepkość oleju maleje, co ułatwia orientację dipoli, prowadząc do wzrostu strat dielektrycznych.



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

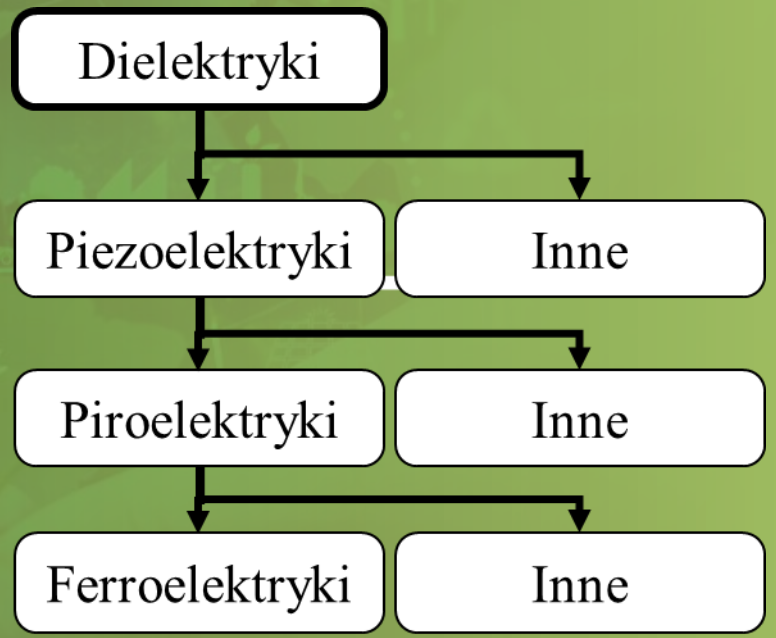
Przy dalszym wzroście temperatury lepkość oleju spada jeszcze bardziej, co powoduje spadek strat związanych z orientacją dipoli. W kolejnym etapie dalszy wzrost temperatury prowadzi do spadku rezystywności oleju, co skutkuje ponownym wzrostem wartości współczynnika strat dielektrycznych.



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

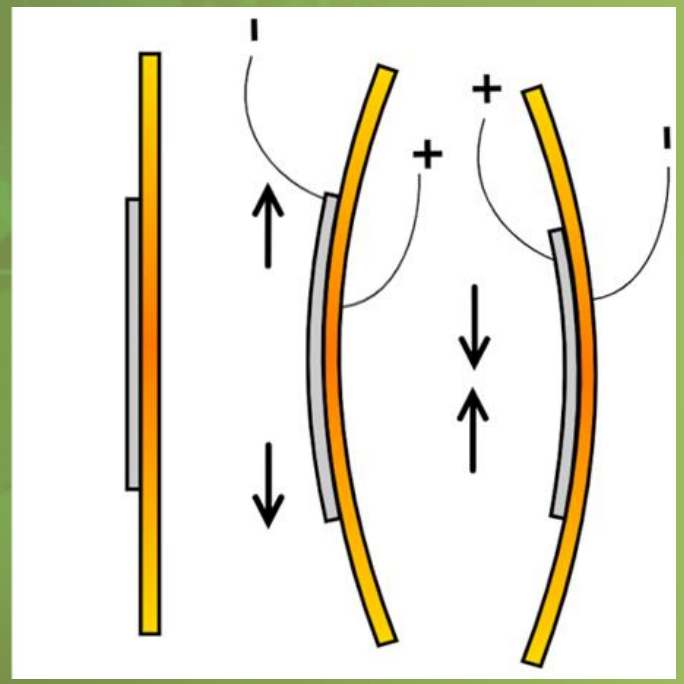
Dielektryki są zazwyczaj stosowane jako materiały elektroizolacyjne. Wśród ogólnej populacji dielektryków znajdują się jednak także materiały, które, ze względu na szczególne zjawiska związane z ich polaryzacją, znalazły inne zastosowania. Należą do nich piezoelektryki, piroelektryki, ferroelektryki i elektrety. Materiały te wykorzystywane są w zaawansowanych technologiach, takich jak czujniki, przetworniki energii czy urządzenia pamięciowe.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

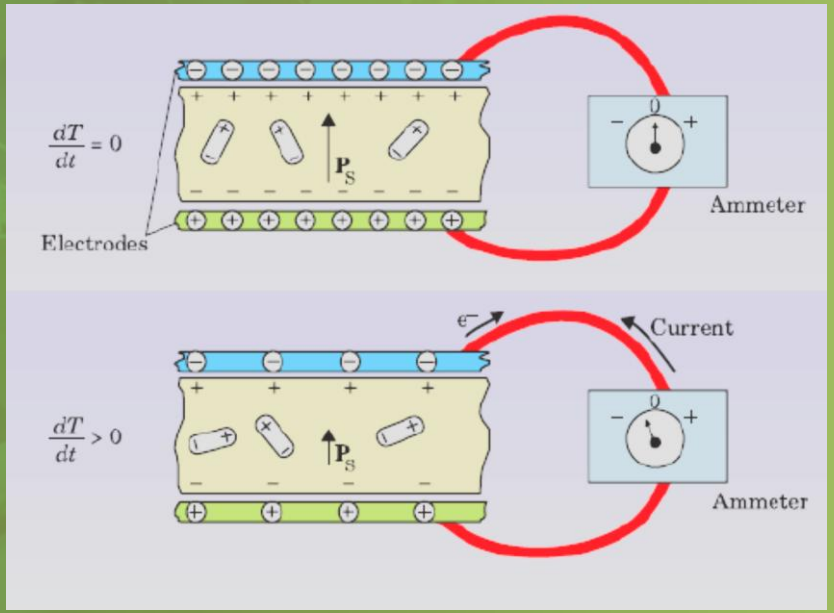
Pierwszą grupą są **materiały piezoelektryczne**, w których zjawisko piezoelektryczne jest na tyle silne, że możliwe jest jego praktyczne zastosowanie.

Zjawisko piezoelektryczne polega na pojawieniu się ładunku elektrycznego na powierzchni niektórych kryształów pod wpływem siły nacisku. Istnieje również odwrócony efekt piezoelektryczny, w którym po przyłożeniu napięcia do kryształu piezoelektrycznego następuje jego odkształcenie.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

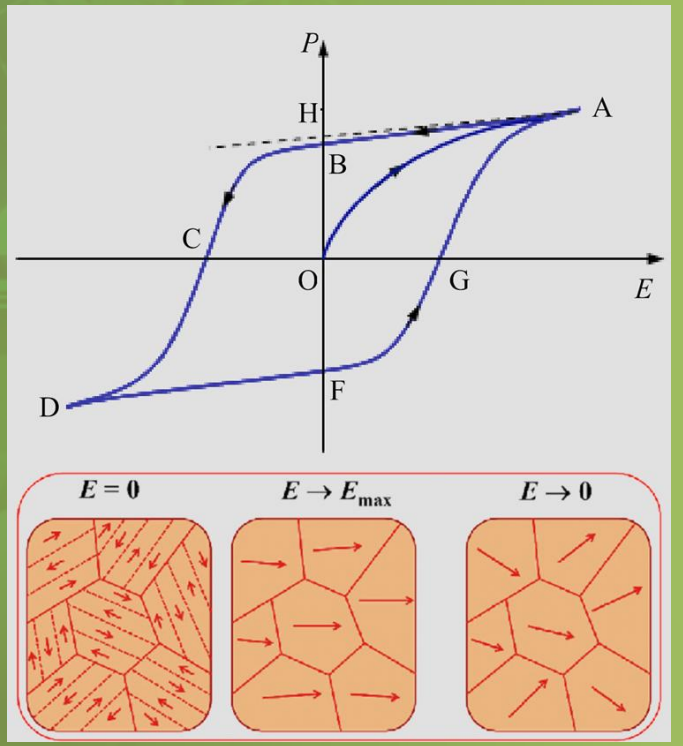
Materiałami piroelektrycznymi nazywamy substancje, w których pod wpływem zmian temperatury pojawia się ładunek elektryczny na powierzchni dielektryka. Wartość ładunku jest proporcjonalna do szybkości zmian temperatury. Przy braku zmian temperatury ładunek na powierzchni materiału zanika. Zjawisko piroelektryczne znajduje zastosowanie w czujnikach podczerwieni, detektorach ciepła czy generatorach energii z gradientów temperatury.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

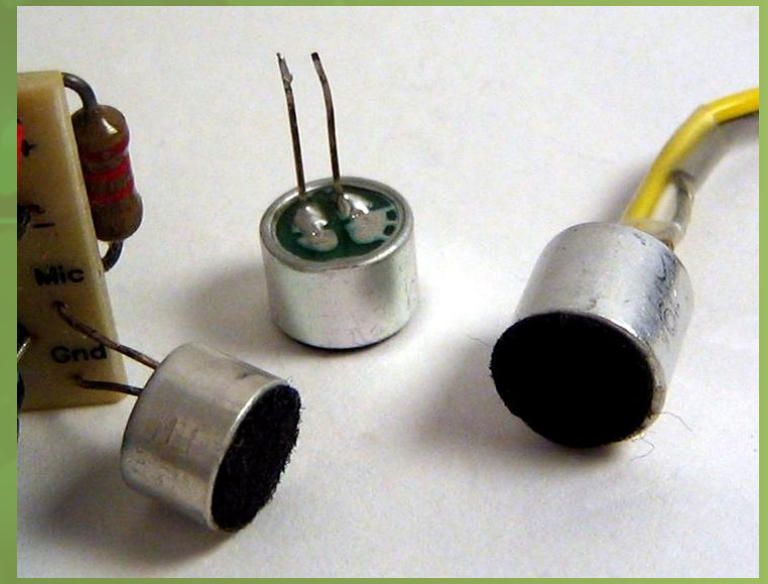
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Ferroelektryki to materiały, które charakteryzują się wysoką względną przenikalnością elektryczną. W materiałach tych występuje spontaniczne uporządkowanie momentów dipolowych sąsiadujących atomów, które tworzą domeny dipolowe. W ferroelektrykach występuje zjawisko histerezy zmian wektora polaryzacji w funkcji natężenia pola elektrycznego. Powyżej specyficznej dla każdego ferroelektryka temperatury, zwanej temperaturą Curie, dochodzi do zaniku zjawiska ferroelektryczności.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Elektrety to materiały charakteryzujące się występowaniem trwałej polaryzacji dipolowej lub obecnością uwięzionych ładunków elektrycznych przy braku zewnętrznego pola elektrycznego. Skutkiem jest wytwarzanie przez elektret stałego pola elektrycznego. Elektrety są elektrostatycznym odpowiednikiem magnesów trwałych. Ze względu na swoje właściwości, elektrety znajdują zastosowanie w mikrofonach, czujnikach i innych urządzeniach elektroakustycznych.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Wytrzymałość elektryczna materiałów izolacyjnych.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Napięcie przebicia – to krytyczna wartość napięcia elektrycznego, przy której dochodzi do przeskoku w gazie lub przebicia elektrycznego w ciele stałym albo cieczy, prowadzącego do utraty właściwości izolacyjnych materiału.

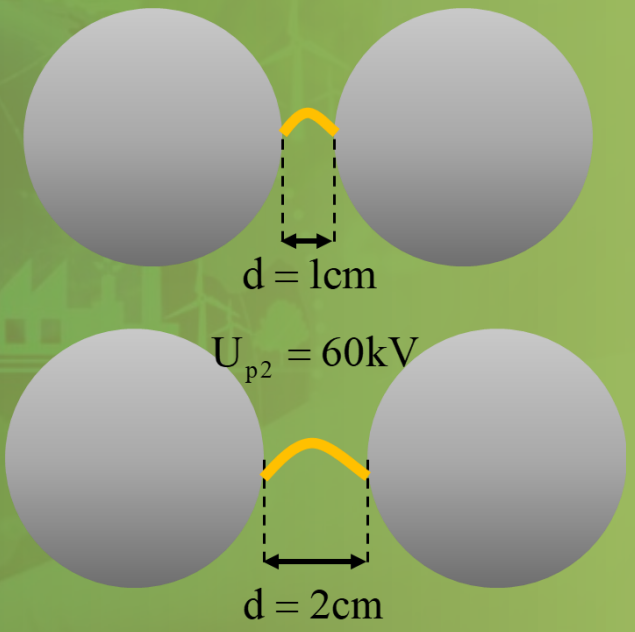
Łuk elektryczny – zjawisko ciągłego wyładowania elektrycznego, charakteryzującego się przepływem prądu elektrycznego, zazwyczaj w gazie, na skutek zjawiska jonizacji.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wytrzymałość elektryczna – wartość natężenia pola elektrycznego E_p odpowiadająca napięciu przebicia. Czynniki wpływające na wytrzymałość elektryczną powietrza:

- Ciśnienie i wilgotność powietrza
- Kształt elektrod
- Temperatura
- Biegunowość i kształt przebiegu napięcia



$$E_p = \frac{30}{1} = 30, \left[\frac{kV}{cm}\right]$$

$$E_p = \frac{60}{2} = 30, \left[\frac{kV}{cm}\right]$$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W warunkach normalnych powietrze jest dielektrykiem. Nie posiada w swojej objętości wystarczającej ilości nośników ładunku by skutecznie przewodzić prąd elektryczny. Zjawiskiem powstawania nośników ładunku z wcześniej obojętnych atomów lub cząsteczek nazywamy **jonizacją**. Wyróżniamy następujące rodzaje jonizacji:

- Jonizację zderzeniową
- Jonizację termiczną gazu
- Jonizację termiczną elektrod
- Fotojonizację

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

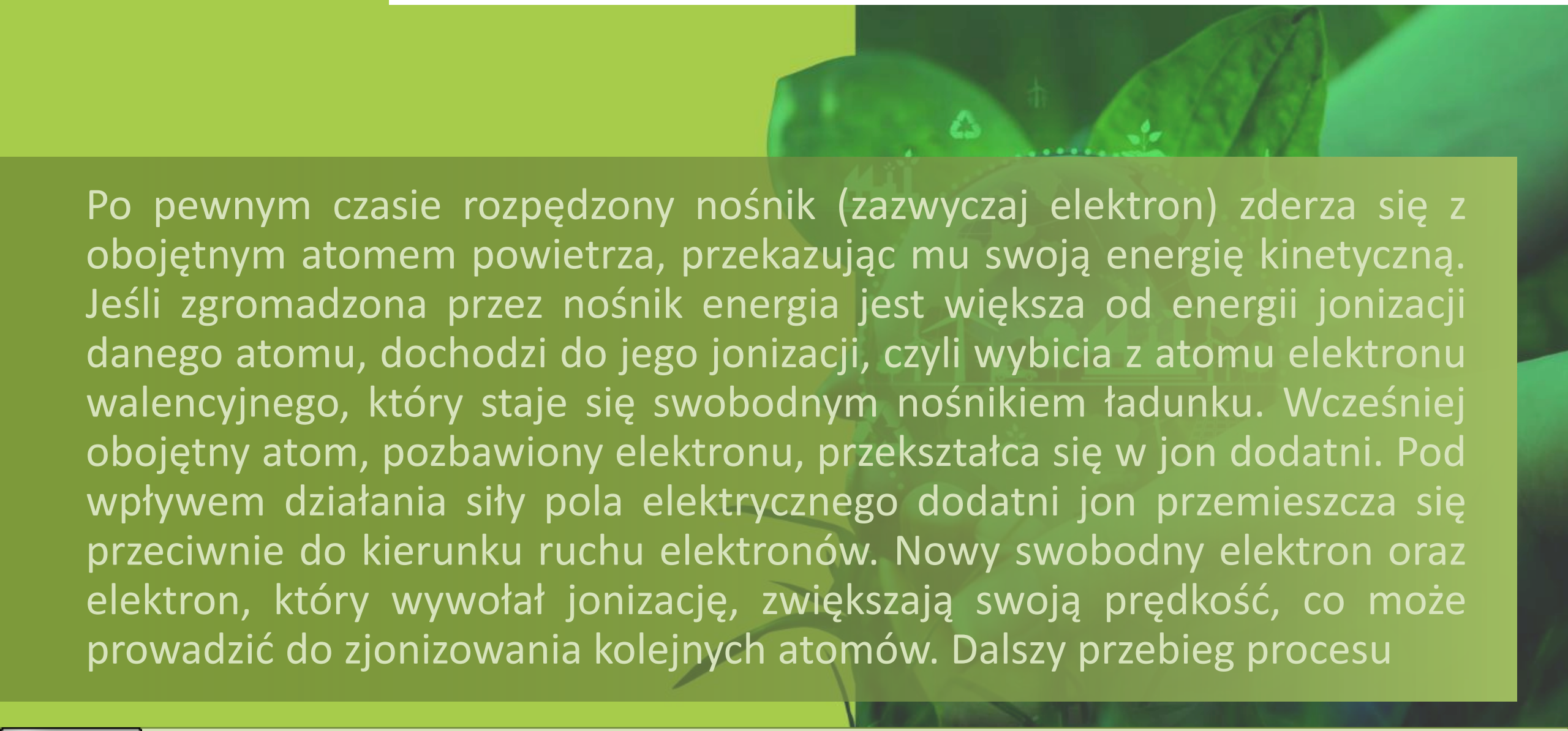
W powietrzu w warunkach normalnych znajduje się niewielka ilość nośników ładunku (elektronów i jonów). Jeśli nośniki te znajdą się w obrębie pola elektrycznego, działa na nie siła *F* proporcjonalna do ładunku nośnika q i natężenia pola elektrycznego *E*:

$$F = qE$$

Zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona, jeśli na ciało działa stała siła, ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym. Wraz ze wzrostem prędkości nośników v, których masa wynosi m_e, rośnie ich energia kinetyczna:

$$E = \frac{m_e v^2}{2}$$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

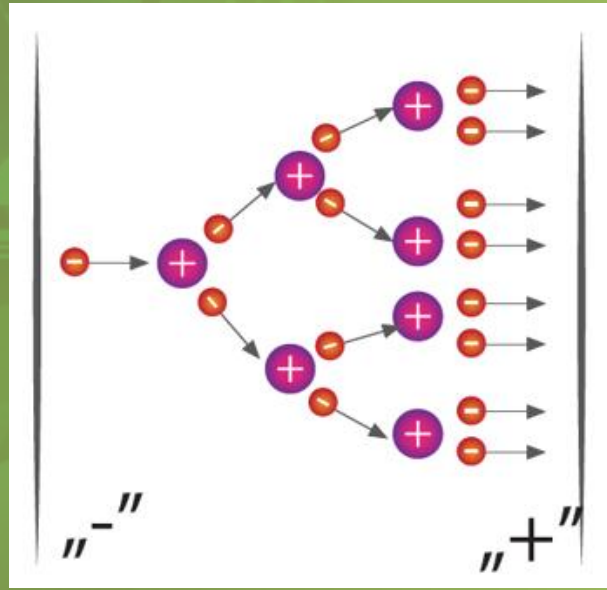


Po pewnym czasie rozpędzony nośnik (zazwyczaj elektron) zderza się z obojętnym atomem powietrza, przekazując mu swoją energię kinetyczną. Jeśli zgromadzona przez nośnik energia jest większa od energii jonizacji danego atomu, dochodzi do jego jonizacji, czyli wybicia z atomu elektronu walencyjnego, który staje się swobodnym nośnikiem ładunku. Wcześniej obojętny atom, pozbawiony elektronu, przekształca się w jon dodatni. Pod wpływem działania siły pola elektrycznego dodatni jon przemieszcza się przeciwnie do kierunku ruchu elektronów. Nowy swobodny elektron oraz elektron, który wywołał jonizację, zwiększają swoją prędkość, co może prowadzić do zjonizowania kolejnych atomów. Dalszy przebieg procesu

CC BY

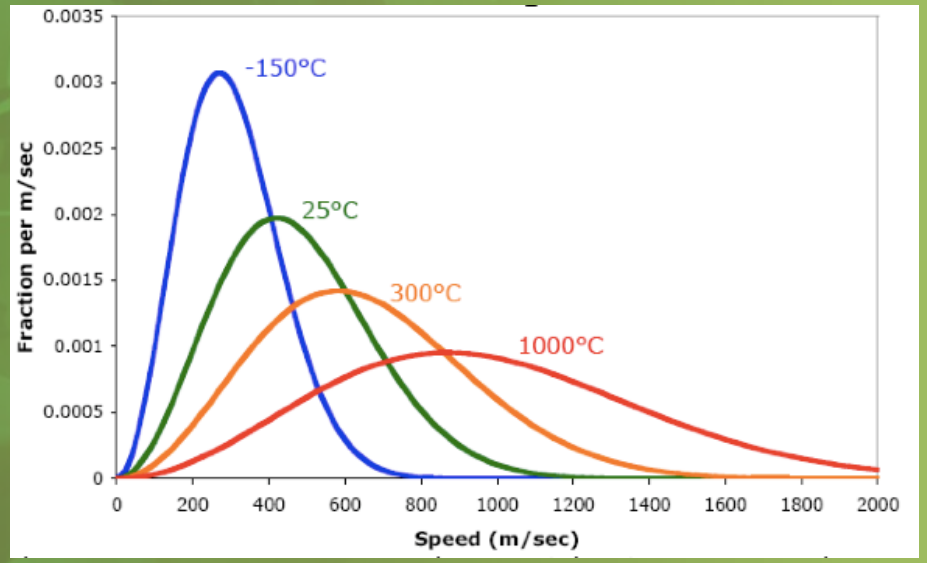
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

jonizacji ma charakter lawinowy. Ze względu na ponad 25 000-krotnie większą masę jonów w porównaniu do masy elektronów, elektrony osiągają znacznie wyższe prędkości niż jony dodatnie. W związku z tym to zderzenia elektronów z obojętnymi atomami są głównym źródłem nowych nośników ładunku. Tego rodzaju jonizację nazywamy **jonizacją zderzeniową.**



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

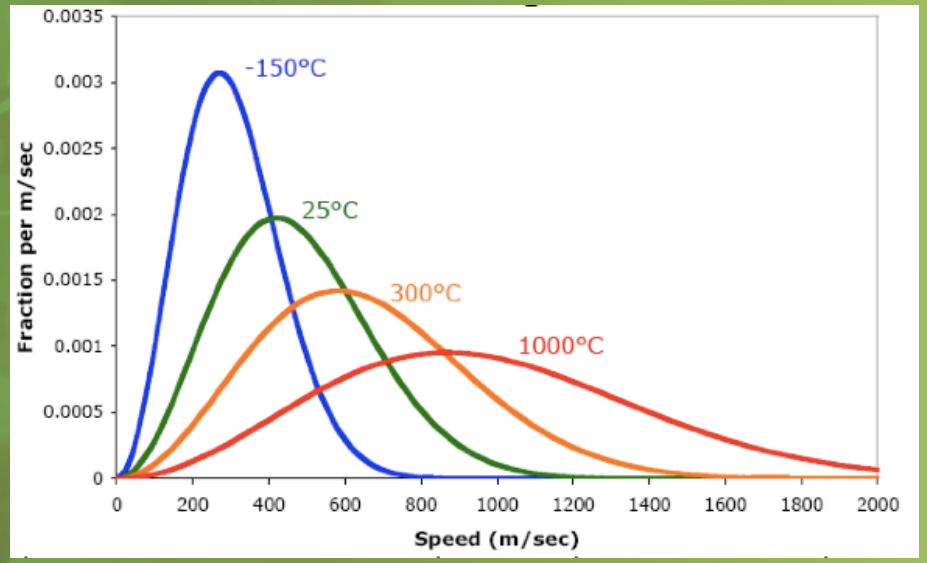
Dla danej temperatury rozkład prędkości cząsteczek gazu opisuje rozkład Maxwella-Boltzmanna, który określa prawdopodobieństwo wystąpienia cząsteczek o określonej prędkości. Im wyższa temperatura, tym wyższa średnia prędkość cząsteczek oraz prawdopodobieństwo wystąpienia wyższych, w porównaniu do niższej temperatury, prędkości cząsteczek gazu.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Oznacza to, że przy wyższych temperaturach zwiększa się prawdopodobieństwo obecności cząsteczek, których prędkość, a tym samym energia kinetyczna, będą wystarczające do zjonizowania gazu. Ten typ jonizacji nazywamy **jonizacją termiczną**. Zachodzi on w wysokich temperaturach rzędu tysięcy kelwinów.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

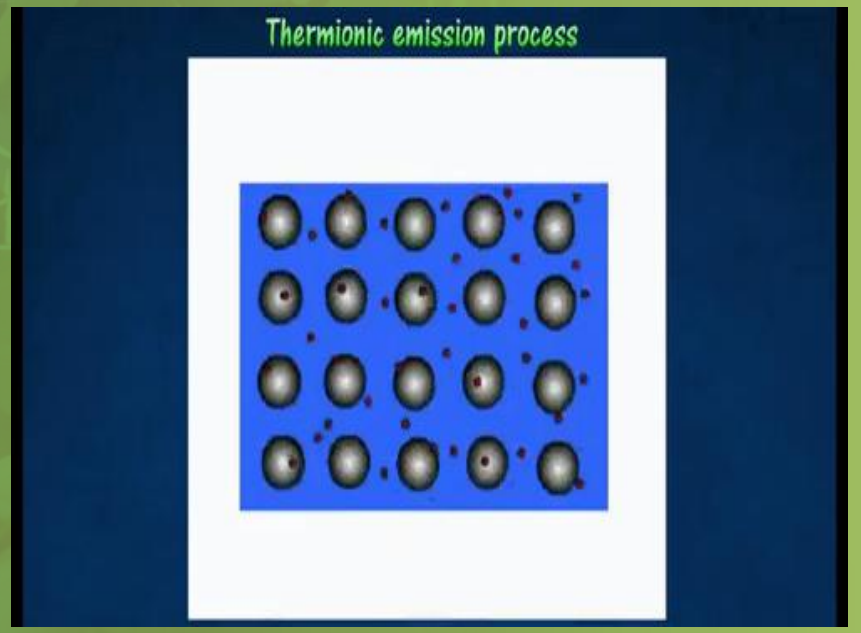
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Rozważmy zachowanie elektronu w metalu. Elektron, należący do gazu elektronowego, przemieszczając się przez sieć krystaliczną, otoczony jest dodatnimi jonami znajdującymi się w jej węzłach. Wypadkowa siła przyciągająca jonów działająca na elektron jest zerowa, ponieważ przyciąganie ze strony jonów otaczających elektron równoważy się wzajemnie. Gdy elektron znajduje się bezpośrednio na powierzchni metalu, w przestrzeni poza metalem nie ma jonów, które mogłyby równoważyć przyciąganie jonów metalu. Powoduje to, że elektrony nie mogą swobodnie opuszczać metalu. Aby elektron mógł opuścić metal, musi osiągnąć energię nazywaną pracą wyjścia. Praca wyjścia jest zdefiniowana jako minimalna

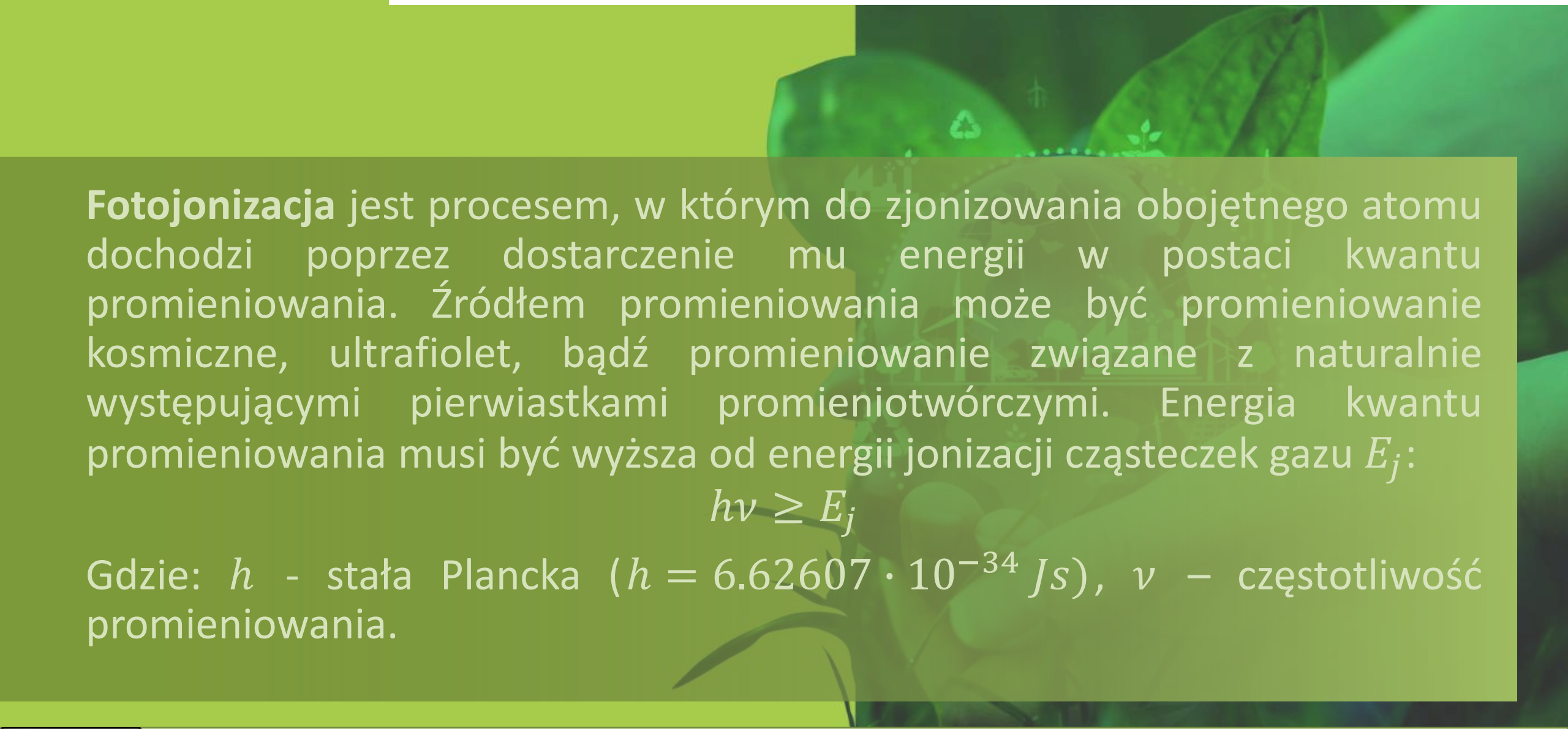
CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

energia, jaką należy dostarczyć elektronowi, aby mógł przezwyciężyć siłę przyciągania jonów metalu i wydostać się na zewnątrz. Wraz ze wzrostem temperatury część elektronów w metalu zyskuje wystarczającą energię kinetyczną, aby osiągnąć pracę wyjścia. Skutkiem tego procesu jest **jonizacja termiczna elektrod**, polegająca na emisji elektronów z powierzchni metalu do otoczenia.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fotojonizacja jest procesem, w którym do zjonizowania obojętnego atomu dochodzi poprzez dostarczenie mu energii w postaci kwantu promieniowania. Źródłem promieniowania może być promieniowanie kosmiczne, ultrafiolet, bądź promieniowanie związane z naturalnie występującymi pierwiastkami promieniotwórczymi. Energia kwantu promieniowania musi być wyższa od energii jonizacji cząsteczek gazu E_j:

$$h\nu \geq E_j$$

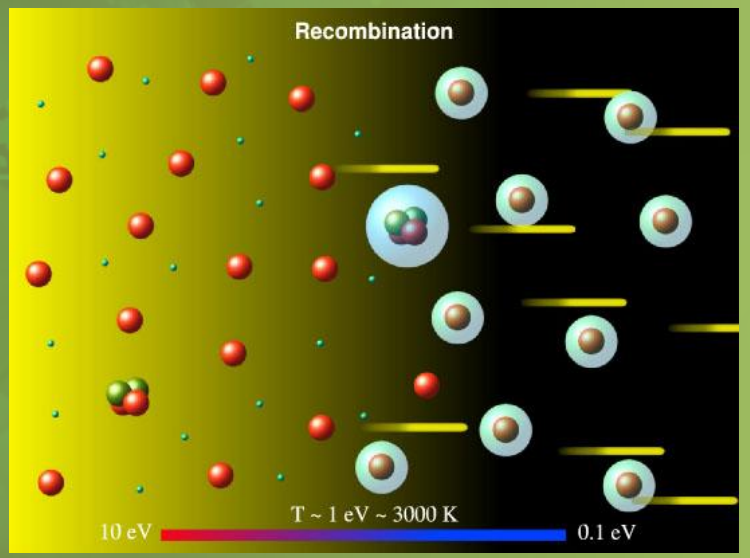
Gdzie: h - stała Plancka $(h = 6.62607 \cdot 10^{-34}\ Js)$, ν – częstotliwość promieniowania.

CC BY

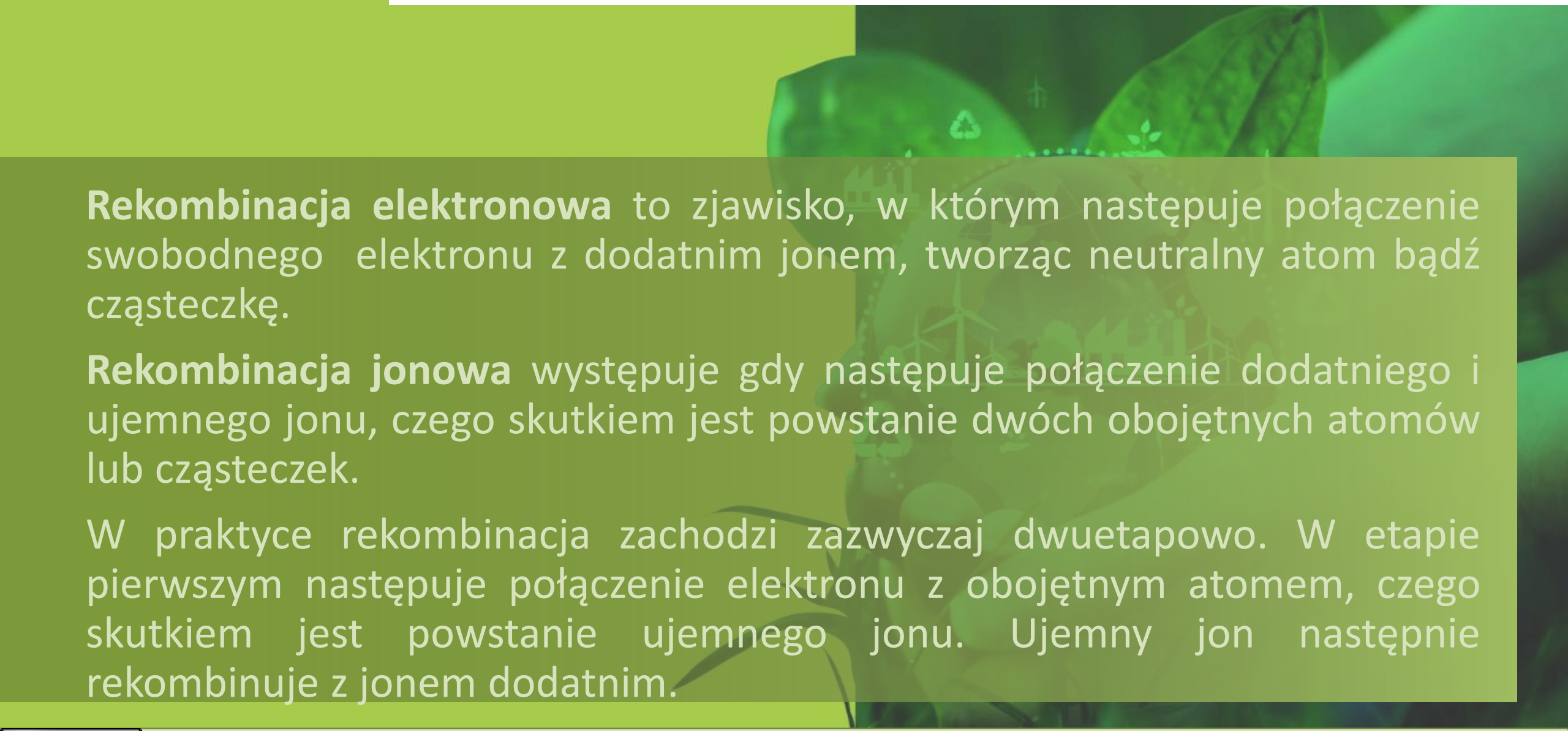
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Procesowi jonizacji towarzyszy proces odwrotny tj. **dejonizacja**, która prowadzi do zaniku swobodnych nośników ładunku. Przyczynami dejonizacji są:

- Neutralizacja ładunków elektrycznych w pobliżu ścianek i elektrod
- Rekombinacja w przestrzeni międzyelektrodowej
- Dyfuzja i dysocjacja



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Rekombinacja elektronowa to zjawisko, w którym następuje połączenie swobodnego elektronu z dodatnim jonem, tworząc neutralny atom bądź cząsteczkę.

Rekombinacja jonowa występuje gdy następuje połączenie dodatniego i ujemnego jonu, czego skutkiem jest powstanie dwóch obojętnych atomów lub cząsteczek.

W praktyce rekombinacja zachodzi zazwyczaj dwuetapowo. W etapie pierwszym następuje połączenie elektronu z obojętnym atomem, czego skutkiem jest powstanie ujemnego jonu. Ujemny jon następnie rekombinuje z jonem dodatnim.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

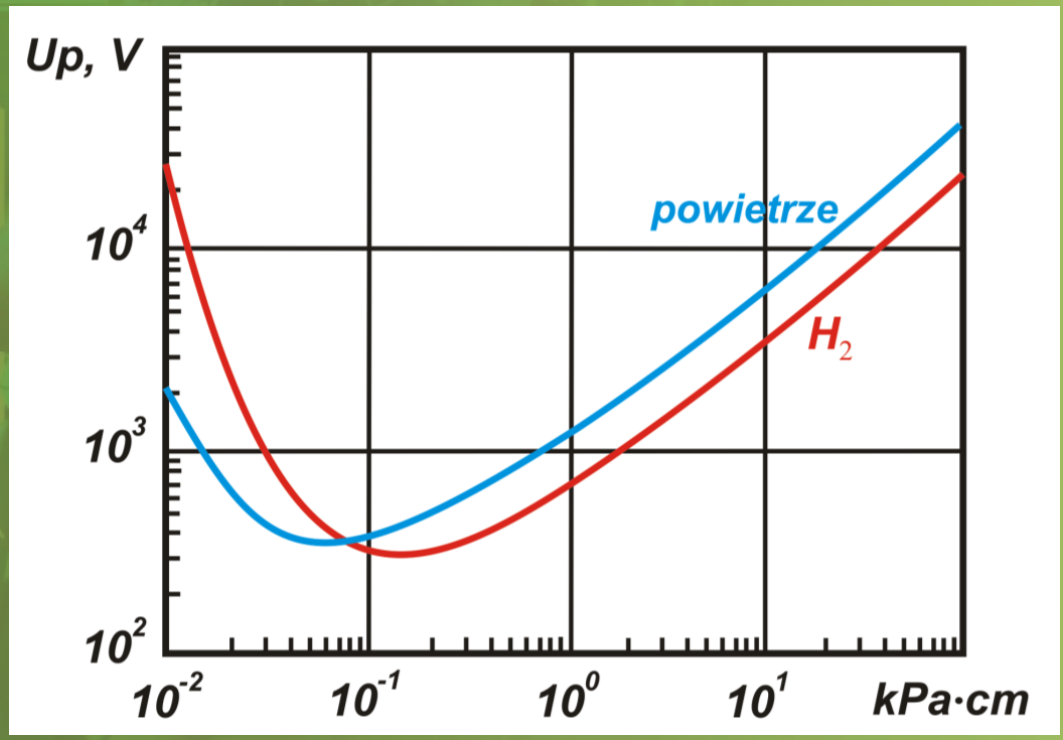
Wraz ze wzrostem ciśnienia gazu maleje średnia droga swobodna, jaką pokonuje elektron rozpędzany dzięki sile działającej na niego od pola elektrycznego. Tym samym maleje szansa na osiągnięcie przez elektron minimalnej energii koniecznej do zjonizowania obojętnej cząstki. Z kolei wraz z obniżaniem ciśnienia gazu, jego wytrzymałość elektryczna maleje, aż do osiągnięcia wartości minimalnej. Dalsze zmniejszanie ciśnienia prowadzi do gwałtownego wzrostu wytrzymałości elektrycznej gazu. W rozrzedzonym gazie liczba cząsteczek gazu na jednostkę objętości jest tak niska, że mimo posiadania przez swobodny elektron wystarczającej energii, szansa na zderzenie z obojętnym atomem i jego zjonizowanie jest bardzo mała.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Zależność napięcia przeskoku U_p od ilorazu odległości d i ciśnienia gazu p opisuje **prawo Pashena**. Minimum krzywej Pashena $U_p \approx 327\,V$ dla powietrza występuje dla iloczynu ciśnienia i odległości $pd \approx 75.6\,\mathrm{Pa}\cdot\mathrm{cm}$.

Przy ciśnieniu normalnym minimum U_p występuje przy odległości elektrod $d \approx 7.5\,\mu m$.



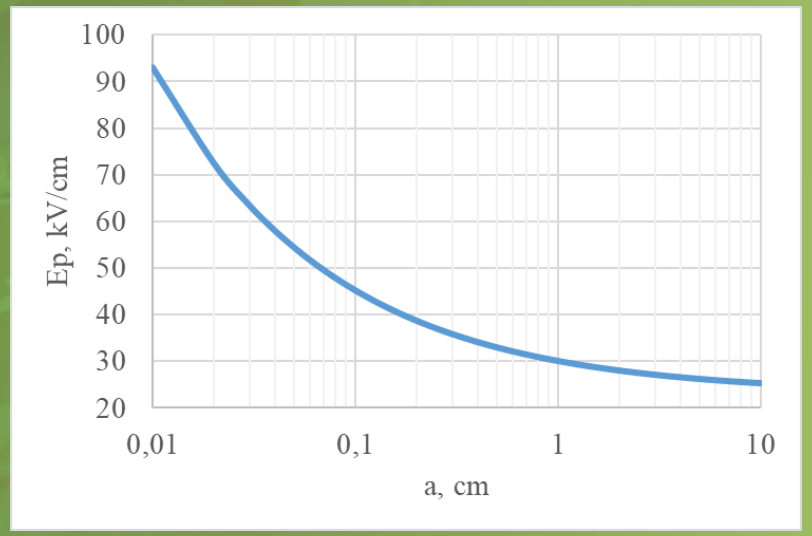
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Dla powietrza, przy napięciu sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz, w warunkach normalnych, wytrzymałość elektryczna w funkcji odległości a pomiędzy elektrodami określana jest jako:

$$E_p = 23 + \frac{7}{\sqrt{a}}, \left[\frac{kV}{cm}\right]$$

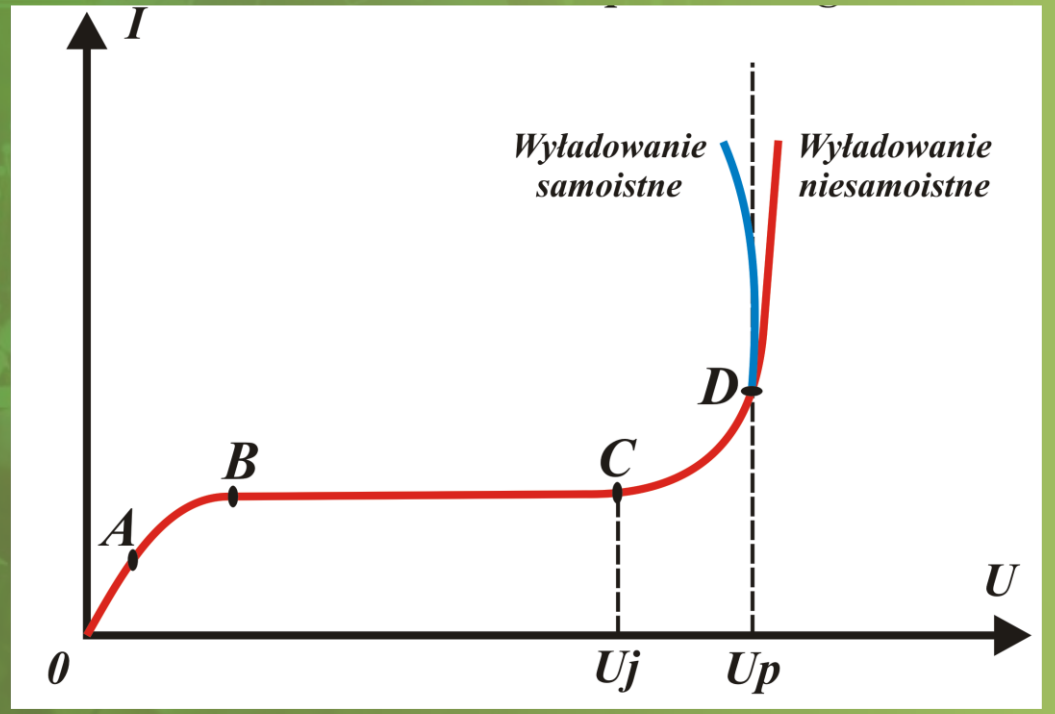
W praktyce dla odległości wyższych od 1 cm przyjmuje się, że wytrzymałość elektryczna powietrza wynosi $30\ kV/cm$.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W warunkach normalnych w powietrzu znajduje się pewna ilość swobodnych nośników ładunku. Przyczyną ich powstawania jest m.in. obecność naturalnego promieniowania, takiego jak promieniowanie kosmiczne. Początkowo (A), wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia, coraz więcej generowanych nośników dociera do elektrod, co skutkuje liniowym wzrostem natężenia prądu. Przy



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

dalszym wzroście napięcia wartość natężenia prądu osiąga stały poziom (B). Dzieje się tak, ponieważ wszystkie naturalnie generowane nośniki biorą udział w przewodzeniu, a co za tym idzie, dalszy wzrost natężenia prądu staje się niemożliwy. Dalszy wzrost napięcia prowadzi do przekroczenia wartości napięcia jonizacji U_j, powyżej którego energia uzyskana przez swobodne nośniki jest wystarczająca do zjonizowania obojętnych cząstek gazu (C). Obecność jonizacji zderzeniowej powoduje wzrost natężenia prądu. Zwiększenie przyłożonego napięcia powyżej wartości napięcia przeskoku U_p prowadzi do jonizacji lawinowej (D), czego skutkiem jest gwałtowny wzrost natężenia prądu.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W zależności od źródła jonizacji i sposobu jego podtrzymania wyładowania w gazach można podzielić na **samoistne i niesamoistne**. Wyładowanie niesamoistne to wyładowanie, którego zapoczątkowanie i podtrzymanie wymaga działania czynnika zewnętrznego, takiego jak promieniowanie kosmiczne, promieniowanie UV czy promieniowanie emitowane przez naturalnie występujące pierwiastki promieniotwórcze. Wyładowanie samoistne to wyładowanie, które po zapoczątkowaniu procesu jonizacji podtrzymuje się samoczynnie, bez konieczności obecności zewnętrznego źródła jonizacji. Nowe lawiny elektronowe powstają zazwyczaj w wyniku emisji elektronów z elektrod, np. na skutek zderzeń jonów z powierzchnią

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

elektrod lub ze względu na fotojonizację.

Wyładowania w gazach możemy podzielić również na **zupełne i niezupełne**. Wyładowania zupełne charakteryzują się połączeniem elektrod poprzez łuk elektryczny, co powoduje przepływ znacznych prądów w obwodzie. Są to wyładowania o stabilnym charakterze, w których pomost plazmowy łączy elektrody na całej przestrzeni międzyelektrodowej. Wyładowania niezupełne to takie, które nie tworzą stabilnego pomostu plazmowego pomiędzy elektrodami. Występują jedynie w części przestrzeni międzyelektrodowej, w miejscach lokalnego zagęszczenia linii pola elektrycznego.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W gazach wyróżniamy dwa mechanizmy rozwoju wyładowania tj. mechanizm Towsenda i mechanizm kanałowy.

W **mechanizmie Townsenda** pierwsze swobodne nośniki osiągają energię wystarczającą do zjonizowania obojętnych cząsteczek gazu. W wyniku tego rozwija się lawina elektronowa, której czoło przemieszcza się w kierunku anody. Jednocześnie powstałe na skutek jonizacji dodatnie jony przemieszczają się w kierunku katody. Zderzeniu dodatnich jonów z powierzchnią katody towarzyszy emisja wtórna elektronów. Elektrony wybite z katody zapoczątkowują rozwój nowych lawin elektronowych,

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

co pozwala na podtrzymanie wyładowania samoistnego. Mechanizm Townsenda obserwuje się dla iloczynów ciśnienia i odległości między elektrodami $pa < 113\ \mathrm{kPa} \cdot \mathrm{cm}$. W warunkach normalnych mechanizm ten zachodzi dla odległości między elektrodami mniejszych niż 1 cm.

W **mechanizmie kanałowym** lawina powstająca w wyniku jonizacji zderzeniowej nie dociera do anody. Jej obecność w przestrzeni międzyelektrodowej zaburza rozkład pola elektrycznego, wzmacniając je w obszarach poza lawiną. Intensywne procesy jonizacji, dejonizacji i wzbudzenia atomów zachodzące w lawinie prowadzą do emisji fotonów. Wyemitowane fotony jonizują obojętne cząstki gazu, tworząc nowe lawiny

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

elektronowe. Powstałe lawiny łączą się, tworząc kanał nazywany strimerem. Pod wpływem przepływu prądu w strimerze dochodzi do jonizacji termicznej. Kanał wydłuża się, ostatecznie łącząc elektrody i prowadząc do wyładowania zupełnego. Mechanizm kanałowy zachodzi dla iloczynów ciśnienia i odległości między elektrodami $pa > 113\ \mathrm{kPa} \cdot cm$. W warunkach normalnych mechanizm ten występuje dla odległości między elektrodami od około 1 cm do 1-2 m.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Czynnikami wpływającymi na wytrzymałość elektryczną dielektryków ciekłych:

- Ciśnienie i temperatura
- Zanieczyszczenie dielektryka
- Biegunowość elektrod i jednorodność pola elektrycznego
- Odstęp między elektrodami
- Czas działania pola elektrycznego

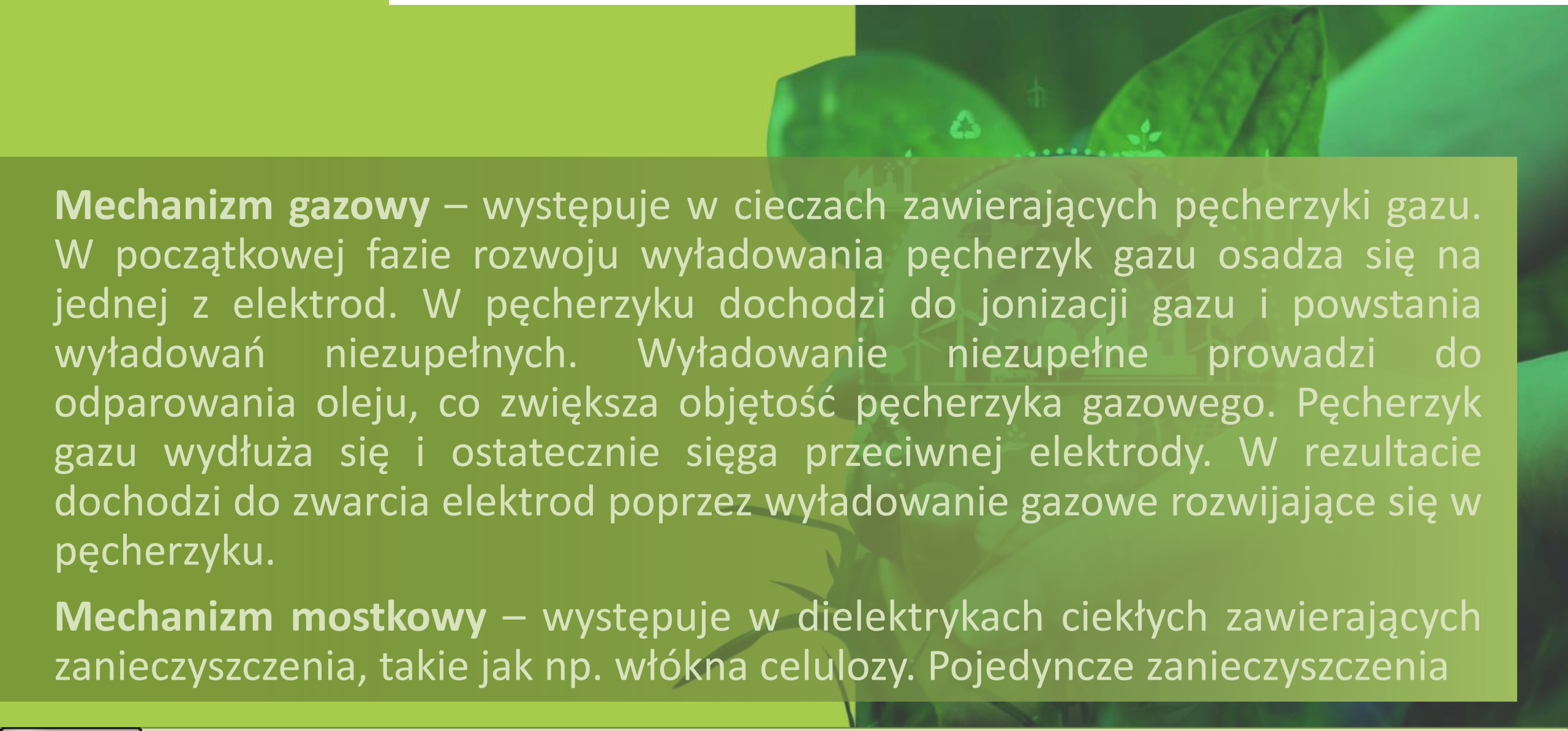
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W dielektrykach ciekłych wyróżniamy trzy mechanizmy rozwoju wyładowani: mechanizm elektronowy, mechanizm gazowy i mechanizm mostkowy.

Mechanizm elektronowy – występuje w cieczach technicznie czystych, które nie zawierają rozpuszczonych cząsteczek gazów. W mechanizmie tym, na skutek lokalnego wzrostu natężenia pola elektrycznego, dochodzi do emisji elektronu z elektrody. Elektron przyspiesza w polu elektrycznym, osiągając energię jonizacji cząsteczki oleju, co prowadzi do powstania lawiny elektronowej, podobnie jak w przypadku wyładowań w gazach.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Mechanizm gazowy – występuje w cieczach zawierających pęcherzyki gazu. W początkowej fazie rozwoju wyładowania pęcherzyk gazu osadza się na jednej z elektrod. W pęcherzyku dochodzi do jonizacji gazu i powstania wyładowań niezupełnych. Wyładowanie niezupełne prowadzi do odparowania oleju, co zwiększa objętość pęcherzyka gazowego. Pęcherzyk gazu wydłuża się i ostatecznie sięga przeciwnej elektrody. W rezultacie dochodzi do zwarcia elektrod poprzez wyładowanie gazowe rozwijające się w pęcherzyku.

Mechanizm mostkowy – występuje w dielektrykach ciekłych zawierających zanieczyszczenia, takie jak np. włókna celulozy. Pojedyncze zanieczyszczenia

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

mogą osadzać się na elektrodach, stając się punktami, w których występuje lokalne zagęszczenie linii pola elektrycznego. Zanieczyszczenia zazwyczaj posiadają wyższą względną przenikalność elektryczną niż ciecz, co prowadzi do działania siły na zanieczyszczenia, powodując ich gromadzenie w obszarze o wyższym natężeniu pola elektrycznego. Ostatecznie zanieczyszczenia tworzą mostek łączący elektrody. Obecność mostka lokalnie zwiększa natężenie pola elektrycznego, co może powodować wyładowanie o mechanizmie gazowym lub elektronowym. Przepływ prądu przez mostek może prowadzić do wzrostu temperatury wystarczającego do odparowania cieczy, co skutkuje wyładowaniem o mechanizmie gazowym.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Czynnikami wpływającymi na wytrzymałość elektryczną dielektryków stałych:

- Niejednorodność pola elektrycznego
- Jednorodność materiału
- Odstęp między elektrodami
- Czas przyłożenia napięcia
- Temperatura

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W dielektrykach stałych wyróżnia się trzy główne mechanizmy przebicia: mechanizm elektryczny, mechanizm cieplny oraz mechanizm jonizacyjno-starzeniowy.

Mechanizm elektryczny - występuje dla bardzo krótkich czasów przyłożenia napięcia (≪1s). Silne pole elektryczne powoduje przejście elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Elektrony, przyspieszane przez pole elektryczne, jonizują atomy dielektryka, co prowadzi do rozwoju wyładowania lawinowo-strimerowego.

Mechanizm cieplny – pod wpływem strat polaryzacyjnych i

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

przewodnościowych w dielektryku wydziela się ciepło. Jeśli ilość ciepła odprowadzanego do otoczenia jest mniejsza niż ilość ciepła generowanego przez straty, temperatura dielektryka rośnie. Wraz ze wzrostem temperatury maleje wytrzymałość elektryczna dielektryka. Jeśli natężenie pola elektrycznego osiągnie wartość krytyczną dla danej temperatury, dochodzi do rozwoju wyładowania samoistnego, którego przebieg jest podobny do mechanizmu elektrycznego.

Mechanizm jonizacyjno-starzeniowy - zachodzi w materiałach, w których występują wtrąciny, takie jak uwięzione bąbelki gazu w dielektryku, lub w obszarach o wysokim natężeniu pola elektrycznego, np. w pobliżu

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

mikroostrzy na elektrodach. W takich miejscach dochodzi do powstawania wyładowań niezupełnych, które działają na dielektryk zarówno elektrycznie, jak i cieplnie, powodując jego postępującą degradację. Z czasem kanał erozyjny łączy elektrody, prowadząc do przebicia dielektryka stałego. Proces ten może trwać wiele lat i często pozostaje niezauważony aż do momentu uszkodzenia.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Starzenie dielektryków. Dielektryki gazowe i ciekłe.

CC BY

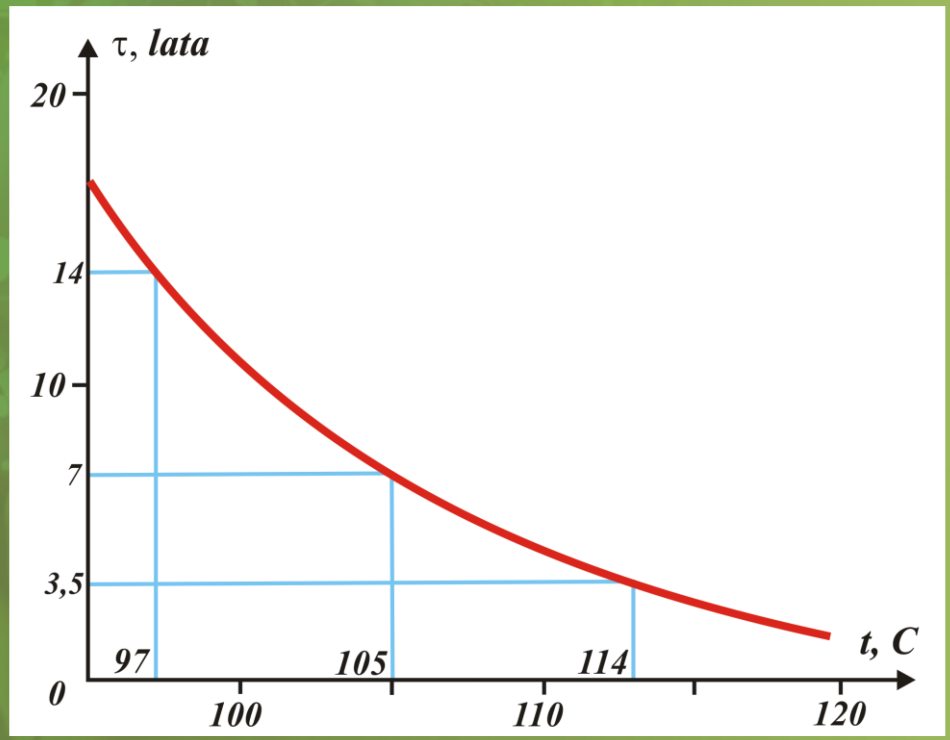
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Materiały izolacyjne podlegają ciągłym procesom starzeniowym, które prowadzą do ich nieodwracalnej degradacji.

Wraz ze wzrostem temperatury nasilają się procesy degradacji na skutek rozpadu chemicznego oraz reakcji utleniania. Proces ten nazywamy starzeniem cieplnym materiałów izolacyjnych.

Miarą trwałości izolacji jest czas τ, który



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

określa po jakim czasie, dla danej temperatury, nastąpi pogorszenie parametrów materiału powyżej wartości granicznej. Obliczany jest jako:

$$\tau = a \cdot e^{-bt}, lata$$

Gdzie: t – temperatura, a, b – parametry zależne od materiału

Materiały izolacyjne zostały podzielone na grupy (klasy ciepłoodporności) w zależności od ich dopuszczalnej temperatury pracy:

Klasa	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
t, C	90	105	120	130	155	180	200	220	250

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

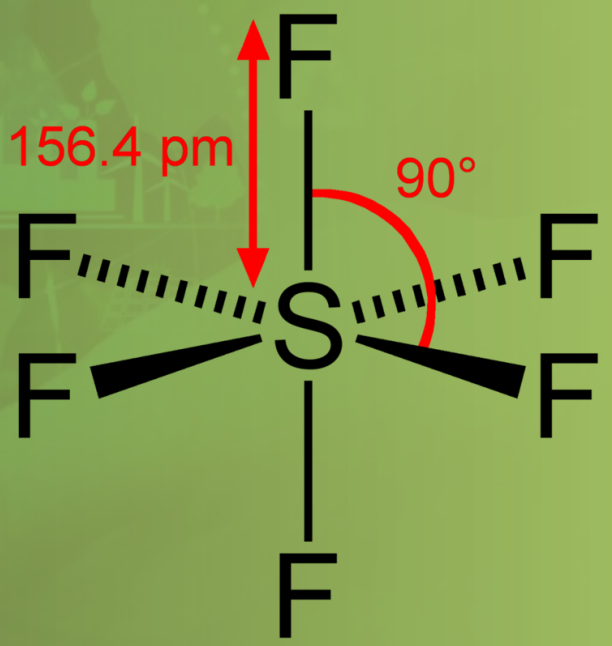
Jednym z najczęściej stosowanych gazów izolacyjnych stosowanych w elektrotechnice jest **powietrze**, będące mieszaniną 78% azotu, 23% tlenu i 1% innych gazów, jak dwutlenek węgla, wodór i gazy szlachetne. W warunkach normalnych niezjonizowane powietrze jest dobrym izolatorem, charakteryzuje się wysoką rezystywnością $\rho_V \approx 10^{17}$ Ωm oraz wytrzymałością elektryczną ok. 30 kV/cm (dla elektrod płaskich w odległości 1cm).

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

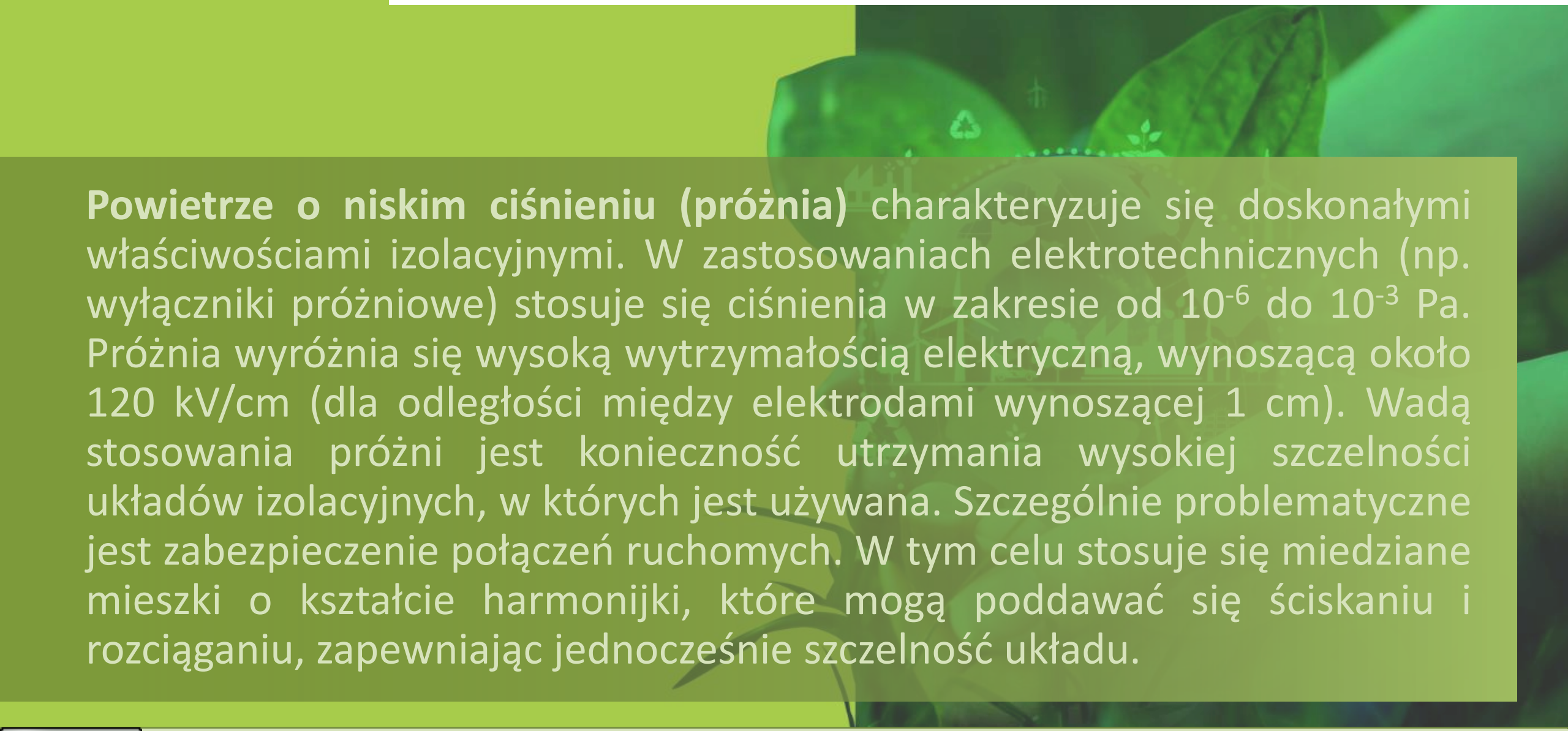
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Sześciofluorek siarki (SF_6) jest elektroujemnym, bezbarwnym, bezwonnym i nietoksycznym gazem o doskonałych właściwościach izolacyjnych. Cechuje się on wysoką wytrzymałością elektryczną 89 kV/cm (dla elektrod płaskich w odległości 1cm). Gaz ten jest pięciokrotnie gęstszy od powietrza, dzięki czemu wypełnia on urządzenia analogicznie jak ciecz. Ze względu na swój wysoki potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (23500 razy większy niż CO_2), ogranicza się jego stosowanie w nowych urządzeniach.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Powietrze o niskim ciśnieniu (próżnia) charakteryzuje się doskonałymi właściwościami izolacyjnymi. W zastosowaniach elektrotechnicznych (np. wyłączniki próżniowe) stosuje się ciśnienia w zakresie od 10^{-6} do 10^{-3} Pa. Próżnia wyróżnia się wysoką wytrzymałością elektryczną, wynoszącą około 120 kV/cm (dla odległości między elektrodami wynoszącej 1 cm). Wadą stosowania próżni jest konieczność utrzymania wysokiej szczelności układów izolacyjnych, w których jest używana. Szczególnie problematyczne jest zabezpieczenie połączeń ruchomych. W tym celu stosuje się miedziane mieszki o kształcie harmonijki, które mogą poddawać się ściskaniu i rozciąganiu, zapewniając jednocześnie szczelność układu.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

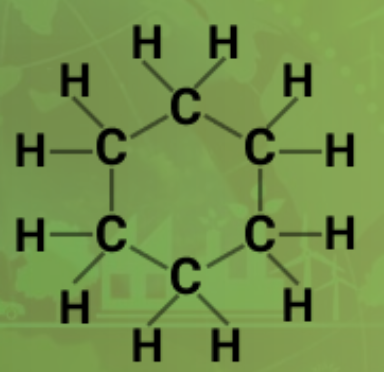
Najczęściej stosowanymi dielektrykami ciekłymi w elektrotechnice są różnego rodzaje oleje izolacyjne. Oleje izolacyjne pełnią szereg funkcji w układach izolacyjnych. Mogą być wykorzystane jako: izolacja elektryczna, chłodziwo, syciwo oraz ośrodek do gaszenia łuku elektrycznego. Najczęściej stosowanym dotychczas olejem izolacyjnym jest olej mineralny, który charakteryzuje się słabą biodegradowalnością oraz niską temperaturą zapłonu. Z tych powodów rozwijane są inne, bardziej przyjazne środowisku, ciecze izolacyjne. Przykładami mogą być naturalne i syntetyczne oleje estrowe oraz np. bio-olej minerlany.

CC BY

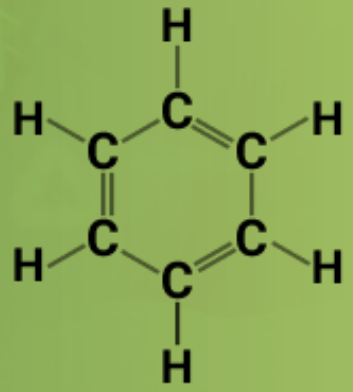
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

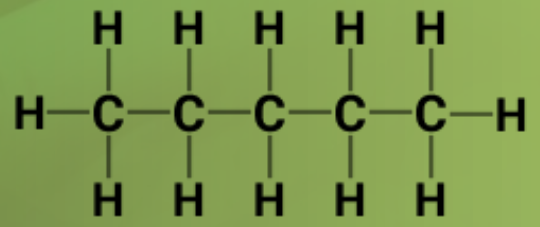
Olej mineralny otrzymuje się w procesie głębokiej rafinacji lekkich frakcji destylatów naftowych. Właściwości fizyczne, chemiczne i elektryczne oleju mineralnego zależą od jego składu, który może się różnić w zależności od metody rafinacji oraz pochodzenia ropy naftowej. Pod względem składu chemicznego olej mineralny jest mieszaniną ciekłych węglowodorów, głównie parafinowych, naftenowych oraz aromatycznych.



Naftenowy



Aromatyczny



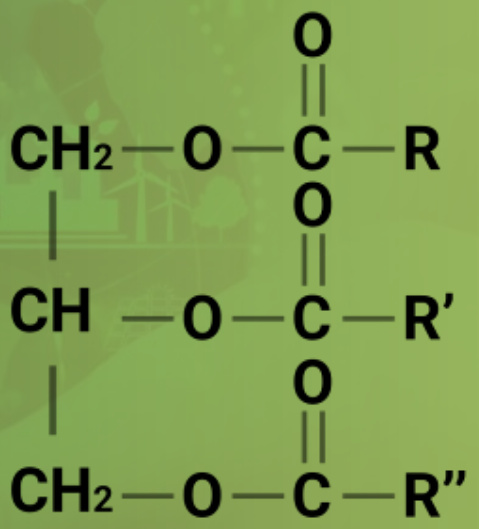
Parafinowy

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Naturalne oleje estrowe wytwarzane są z olejów roślinnych, najczęściej pozyskiwanych z soi, rzepaku i słonecznika. Główną ich wadą jest niska stabilność oksydacyjna, wysoki współczynnik strat dielektrycznych oraz wysoka lepkość. Do zalet można zaliczyć biodegradowalność, wysoką temperaturę zapłonu, a także ich przyjazność środowisku, co sprawia, że są stosowane jako alternatywa dla olejów mineralnych w transformatorach.

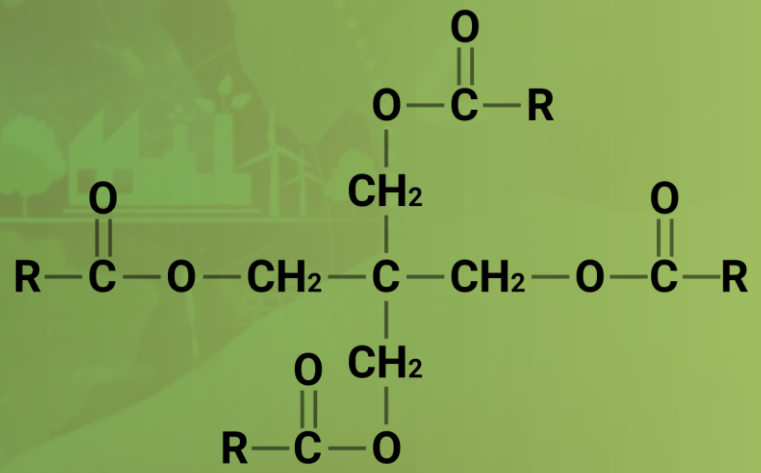


R, R', R" – reszta kwasu tłuszczowego

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wzrastająca świadomość ekologiczna oraz konieczność stosowania transformatorów energetycznych w miejscach o dużych negatywnych skutkach potencjalnego wycieku cieczy izolacyjnej doprowadziły do opracowania w roku 1970 **syntetycznego oleju estrowego** do zastosowań elektrycznych. Posiadają one wszystkie zalety naturalnych olei estrowych oraz charakteryzują się wysoką stabilnością oksydacyjną. Ich wadą jest wyższa cena.



R – nasycone łańcuchy węglowe

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jednym z najnowszych, ekologicznie bezpiecznych olejów izolacyjnych jest **bioolej mineralny**. Powstaje on z węglowodorów pochodzenia biologicznego i posiada większość zalet ropopochodnego oleju mineralnego, charakteryzując się jednocześnie wysoką biodegradowalnością. Wadą bio oleju mineralnego jest jego wysoka cena oraz nieznacznie niższa temperatura zapłonu w porównaniu do tradycyjnego oleju mineralnego.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Dielektryki stałe.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

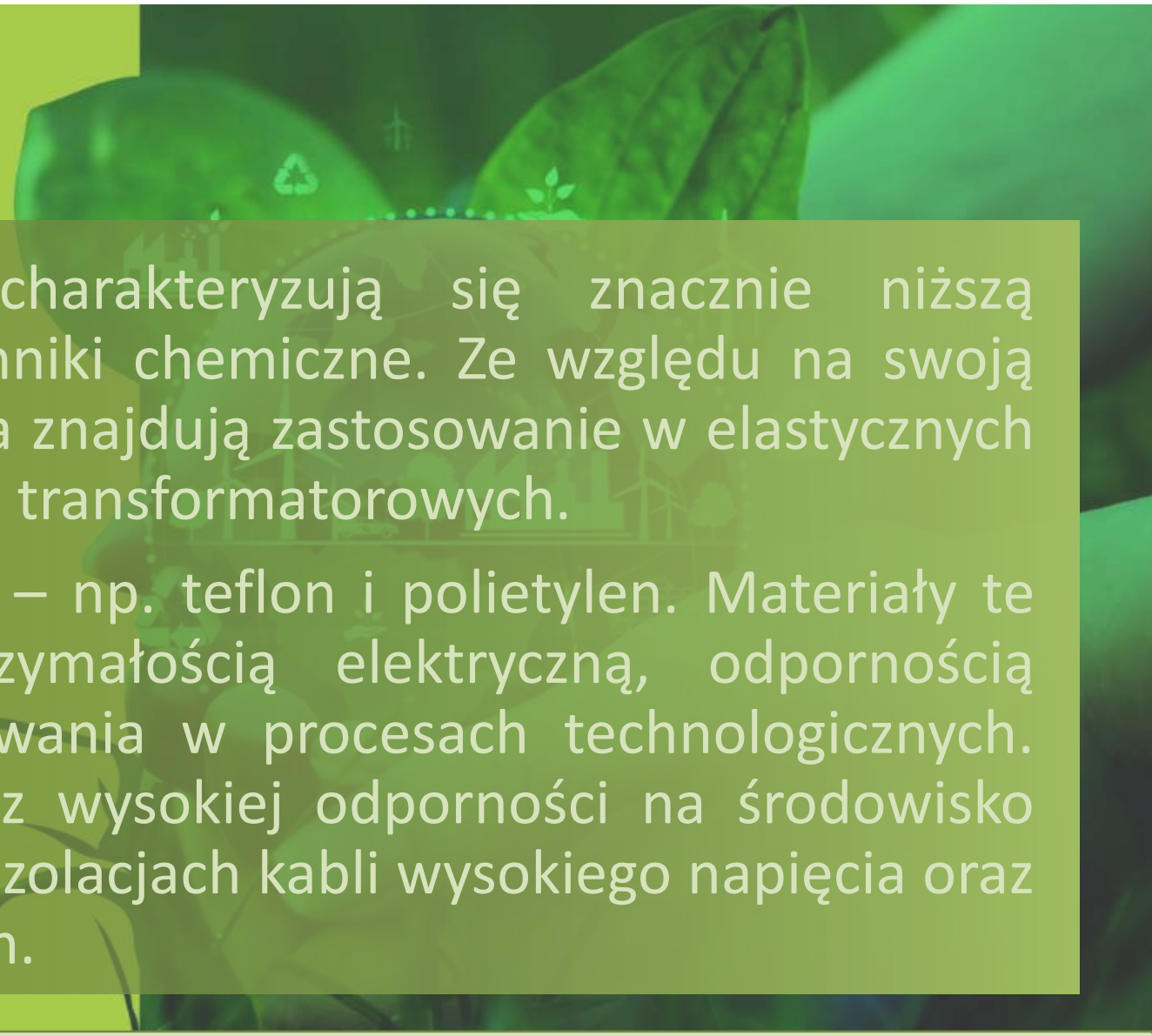
Materiały dielektryczne stałe możemy podzielić na trzy główne grupy:

Materiały nieorganiczne naturalne – mają pochodzenie naturalne, jak np. kwarc i mika. Cechują się one wysoką odpornością na temperaturę, zazwyczaj wysoką wytrzymałością mechaniczną oraz dużą stabilnością chemiczną. Ze względu na swoje właściwości są wykorzystywane w elementach izolacyjnych pracujących w wysokich temperaturach, izolatorach ceramicznych i przekładkach dielektrycznych.

Materiały organiczne naturalne – są pochodzenia roślinnego bądź zwierzęcego, jak np. celuloza i kauczuk naturalny. Cechuje je dobra

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



wytrzymałość elektryczna, ale charakteryzują się znacznie niższą odpornością na temperaturę i czynniki chemiczne. Ze względu na swoją elastyczność i łatwość przetwarzania znajdują zastosowanie w elastycznych osłonach przewodów oraz izolacjach transformatorowych.

Materiały organiczne syntetyczne – np. teflon i polietylen. Materiały te charakteryzują się wysoką wytrzymałością elektryczną, odpornością chemiczną oraz łatwością kształtowania w procesach technologicznych. Dzięki niskiej absorpcji wilgoci oraz wysokiej odporności na środowisko chemiczne są szeroko stosowane w izolacjach kabli wysokiego napięcia oraz komponentach mikroelektronicznych.

CC BY

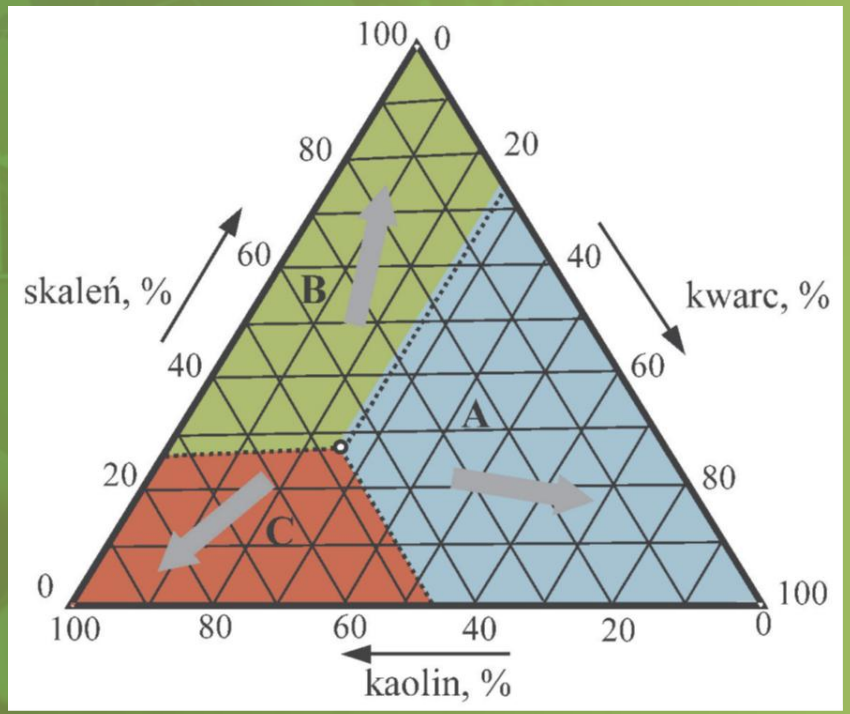
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Porcelana – tworzywo ceramiczne składające głównie z kaolinu ($Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 2H_2O$), kwarcu ($SiO_2$) oraz skalenia ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$). W zależności od proporcji składników tworzywa uzyskuje się właściwości:

A – zwiększenie wytrzymałości mechanicznej

B – zwiększenie wytrzymałości elektrycznej

C – Zwiększenie odporności cieplnej



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W elektrotechnice porcelanę wykorzystuje się głównie do wykonywania izolatorów. Główne zastosowanie znalazły porcelany C110 (kwarcowa), C120 (wysokoglinowa) i C130 (wysokoglinowa o dużej wytrzymałości). Do głównych zalet porcelany należą: dobre właściwości elektroizolacyjne, wysoka wytrzymałość cieplna i mechaniczna, wysoka odporność na warunki atmosferyczne, niski koszt i dostępność surowców do produkcji. Do wad porcelany zaliczamy porowatość, która ułatwia wnikanie wody, czego skutkiem jest pogorszenie właściwości elektrycznych materiału. Aby poprawić właściwości porcelany, stosuje się szkliwienie, które zmniejsza jej porowatość oraz zwiększa odporność na działanie czynników atmosferycznych.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Steatyt – tworzywo składające się w około 80% z surowego i palonego talku (hydrokrzemianu magnezu) oraz glin plastycznych i skalenia. Surowy materiał jest miękki, co ułatwia procesy produkcyjne. Utwardzenie uzyskuje się poprzez wypalanie w temperaturze powyżej 1000 °C. Steatyt charakteryzuje się doskonałymi właściwościami mechanicznymi i elektrycznymi. Zachowuje wysoką rezystywność nawet przy wysokich temperaturach. Wykorzystywany jest do produkcji elementów o wysokiej odporności mechanicznej oraz cieplnej.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Szkła – powstają w wyniku stopienia krzemionki (SiO_2), zazwyczaj w postaci piasku kwarcowego. Właściwości szkła zmienia się poprzez wprowadzanie dodatki. Tlenki sodu i potasu (Na_2O, K_2O) obniżają temperaturę topnienia szkła. Tlenek wapnia (CaO) zwiększa wytrzymałość chemiczną i mechaniczną. Tlenek boru (B_2O_3) zwiększa odporność na szok termiczny oraz poprawia właściwości elektryczne. Tlenki ołowiu (PbO) zwiększają gęstość i współczynnik załamania światła. Do produkcji izolatorów najczęściej stosuje się szkło sodowo-wapniowe.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Mika – grupa materiałów krzemianowych o warstwowej strukturze, wysokiej odporności na temperaturę i bardzo dobrych właściwościach izolacyjnych. Jest dobrym przewodnikiem ciepła i wykazuje dużą odporność na wyładowania niezupełne oraz starzenie. W technice stosowane są głównie dwie odmiany: mika magnezowa (flogopit) i mika potasowa (muskowit). Mika zazwyczaj stosowana jest w postaci mikanitu, który powstaje poprzez klejenie płatków miki żywicznymi lepiszczami i formowanie ich w folie oraz płyty.

CC BY

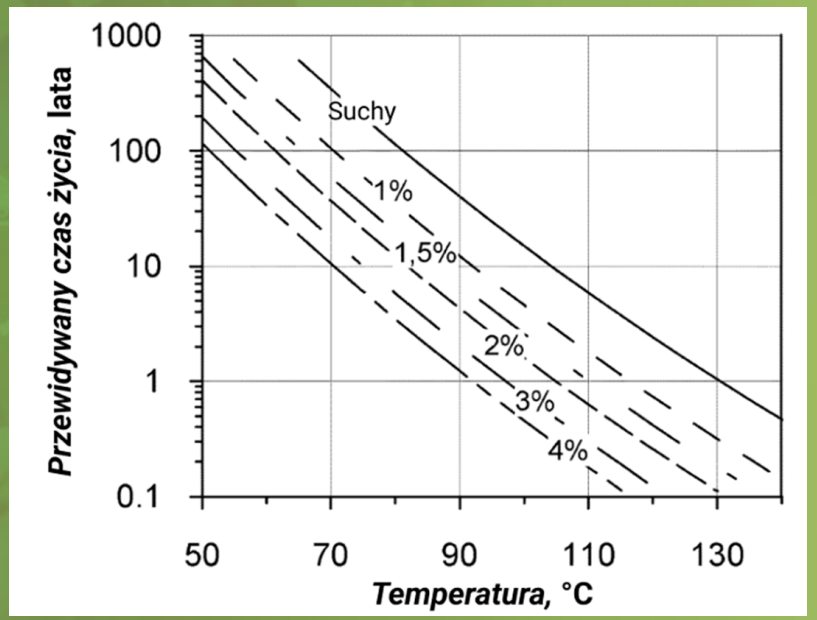
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Celuloza – naturalnie występujący w przyrodzie biopolimer. W elektrotechnice wykorzystywana jest w formie preszpanu bądź papieru elektrotechnicznego. Pozyskiwana jest w procesie oczyszczania pulpy drzewnej drzew iglastych. Ze względu na higroskopijne właściwości celulozy zazwyczaj przed jej zastosowaniem jako dielektryka poddawana jest suszeniu próżniowemu, a następnie impregnacji olejem izolacyjnym. Wykorzystywana jest jako izolacja transformatorów energetycznych i izolatorów przepustowych.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

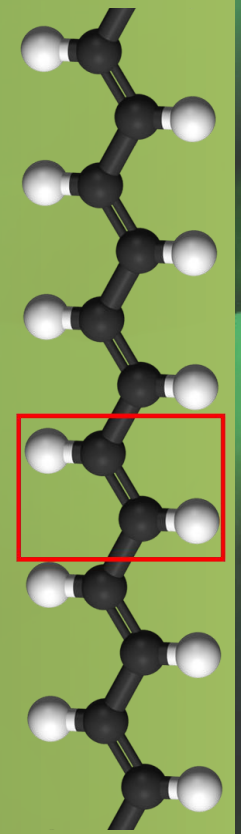
Głównym czynnikiem wpływającym na stan izolacji celulozowej jest stopień jej zawilgocenia oraz temperatura pracy. W trakcie wieloletniej eksploatacji izolacji stopniowo wzrasta poziom jej zawilgocenia, głównie ze względu na wilgoć dostającą się z zewnątrz urządzenia. Aby chronić izolację celulozową przed wnikaniem wilgoci oraz ułatwić jej chłodzenie, impregnuje się ją olejami izolacyjnymi. Ten typ izolacji nazywany jest izolacją papierowo-olejową



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

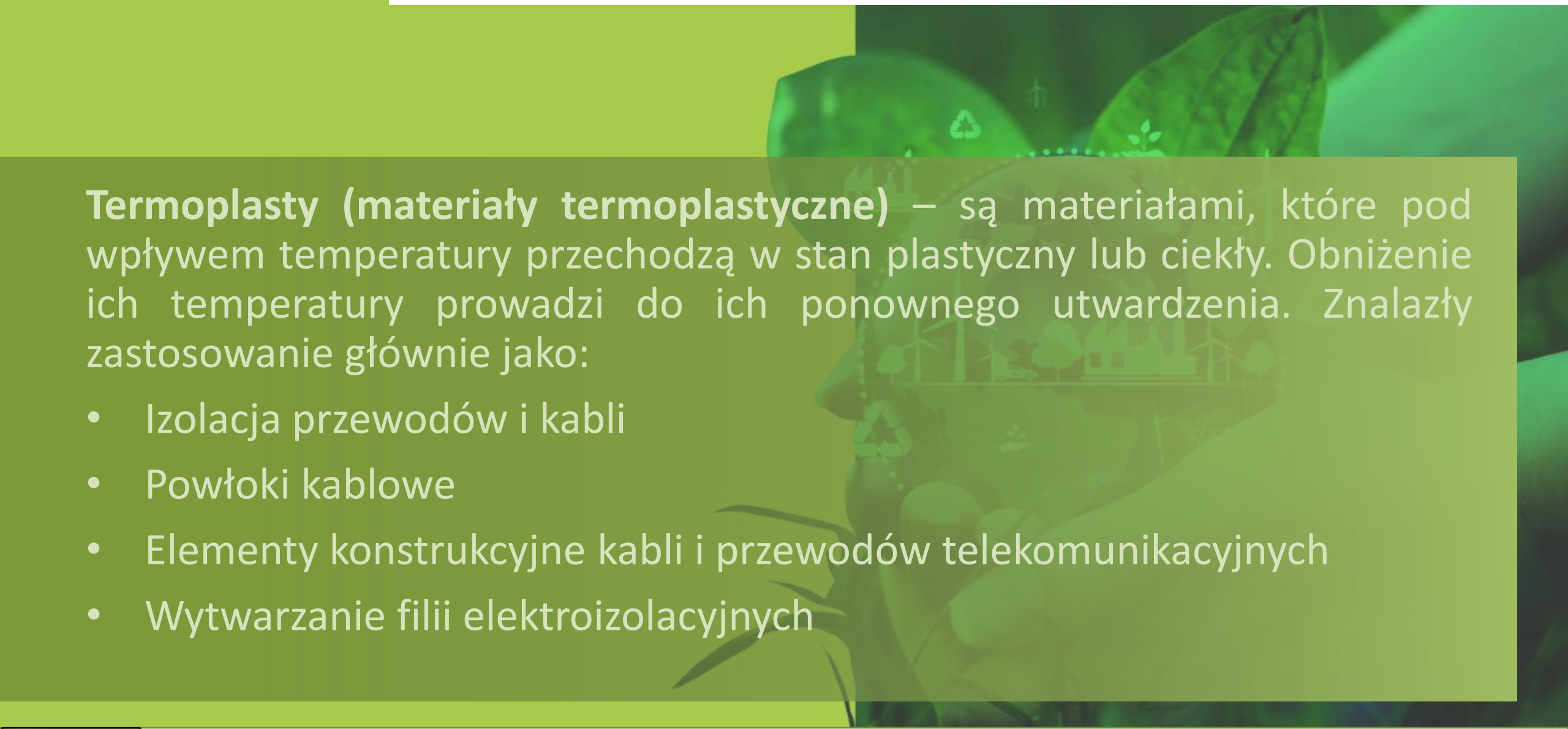
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Polimery – substancje chemiczne zbudowane z powtarzających się jednostek, które nazywamy merami. Mery zbudowane są zazwyczaj z atomów węgla, wodoru, tlenu i azotu, rzadziej z krzemu, fluoru i chloru. Makrocząsteczka składa się z tysięcy atomów połączonych silnymi wiązaniami kowalencyjnymi o energiach rzędu $E_d \approx 10^5 - 10^6$ J/mol. Pomiędzy poszczególnymi makrocząsteczkami polimeru występują znacznie słabsze wiązania Van der Waalsa o energii wiązania rzędu $E_d \approx 10^2 - 10^3$ J/mol. Właściwości polimerów, takie jak elastyczność, wytrzymałość mechaniczna czy odporność chemiczna, zależą od rodzaju merów oraz sposobu ich wzajemnego połączenia.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



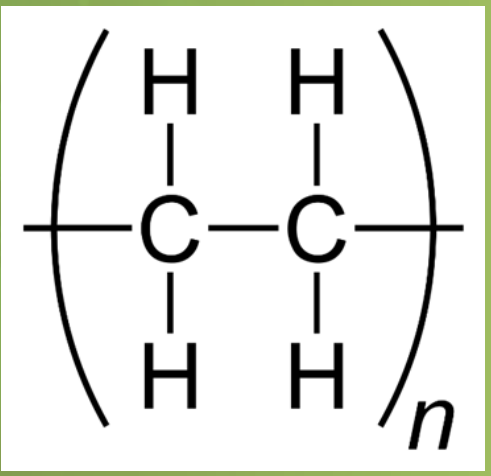
Termoplasty (materiały termoplastyczne) – są materiałami, które pod wpływem temperatury przechodzą w stan plastyczny lub ciekły. Obniżenie ich temperatury prowadzi do ich ponownego utwardzenia. Znalazły zastosowanie głównie jako:

- Izolacja przewodów i kabli
- Powłoki kablowe
- Elementy konstrukcyjne kabli i przewodów telekomunikacyjnych
- Wytwarzanie filii elektroizolacyjnych

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Polietylen (PE) – wytwarzany jest poprzez polimeryzację etylenu. Właściwości elektryczne i mechaniczne polietylenu są ściśle związane z ciśnieniem, w którym doszło do polimeryzacji. Charakteryzuje się dobrymi właściwościami elektrycznymi, takimi jak niewielka przenikalność elektryczna, wysoka wytrzymałość elektryczna i rezystywność. Jest odporny na większość związków chemicznych oraz na działanie wody. Polietylen ma niską odporność na promieniowanie ultrafioletowe, jednak może ona zostać zwiększona poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków. Jest łatwopalny i przenosi ogień.

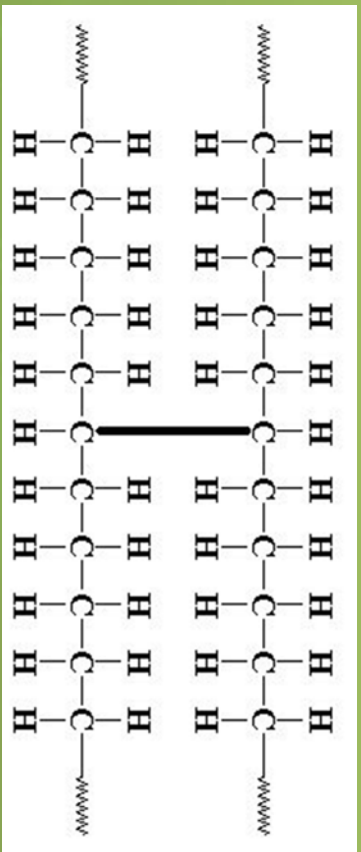


CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Polietylen sieciowany (XLPE) – materiał powstały w wyniku procesu sieciowania polietylenu, który polega na tworzeniu wiązań poprzecznych między makrocząsteczkami. Sieciowanie polietylenu zwiększa jego wytrzymałość mechaniczną, cieplną oraz chemiczną.

Polietylen spieniony – uzyskiwany poprzez wprowadzanie pęcherzyków gazu do struktury materiału. Skutkiem tego jest zmniejszenie przenikalności elektrycznej, dzięki czemu materiał ten znajduje zastosowanie w produkcji przewodów wykorzystywanych w obwodach wysokoczęstotliwościowych.



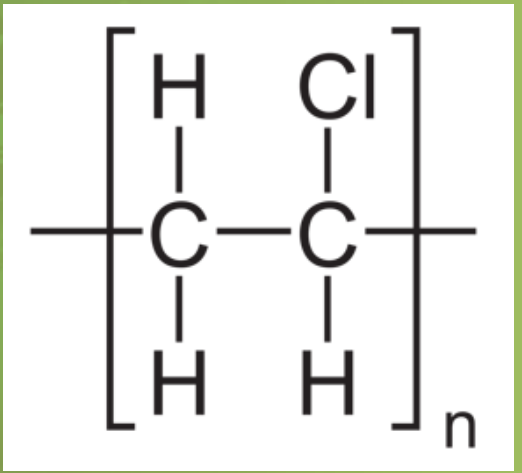
CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

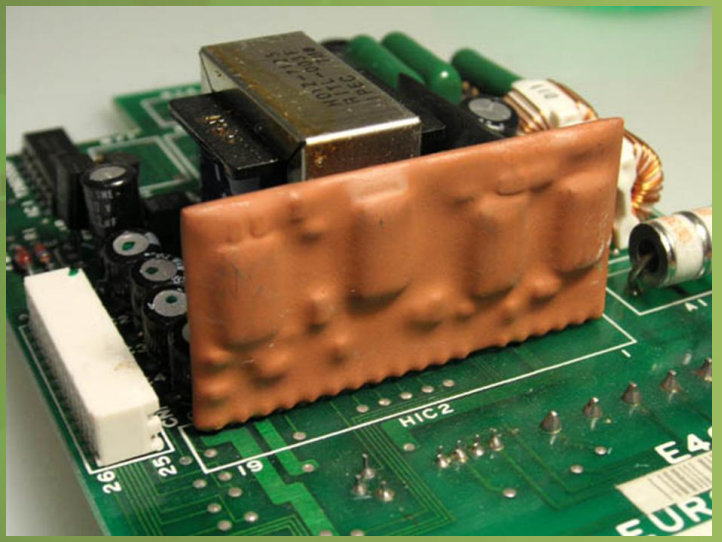
Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Polichlorek winylu (PVC) - materiał powstający na skutek polimeryzacji chlorku winylu. Charakteryzuje się podwyższoną odpornością na ogień (nie przenosi go) oraz odpornością na działanie promieniowania ultrafioletowego, ozonu, olejów oraz większości rozpuszczalników. Z perspektywy chemicznej jest łatwy w modyfikacji. Stosując odpowiednie dodatki, można uzyskać jego różne odmiany, np. polwinit, który jest zmiękczonym PVC, oraz winidur, który jest utwardzonym PVC. Dzięki swoim właściwościom PVC jest stosowany w produkcji izolacji przewodów, osłon kablowych oraz rur instalacyjnych.



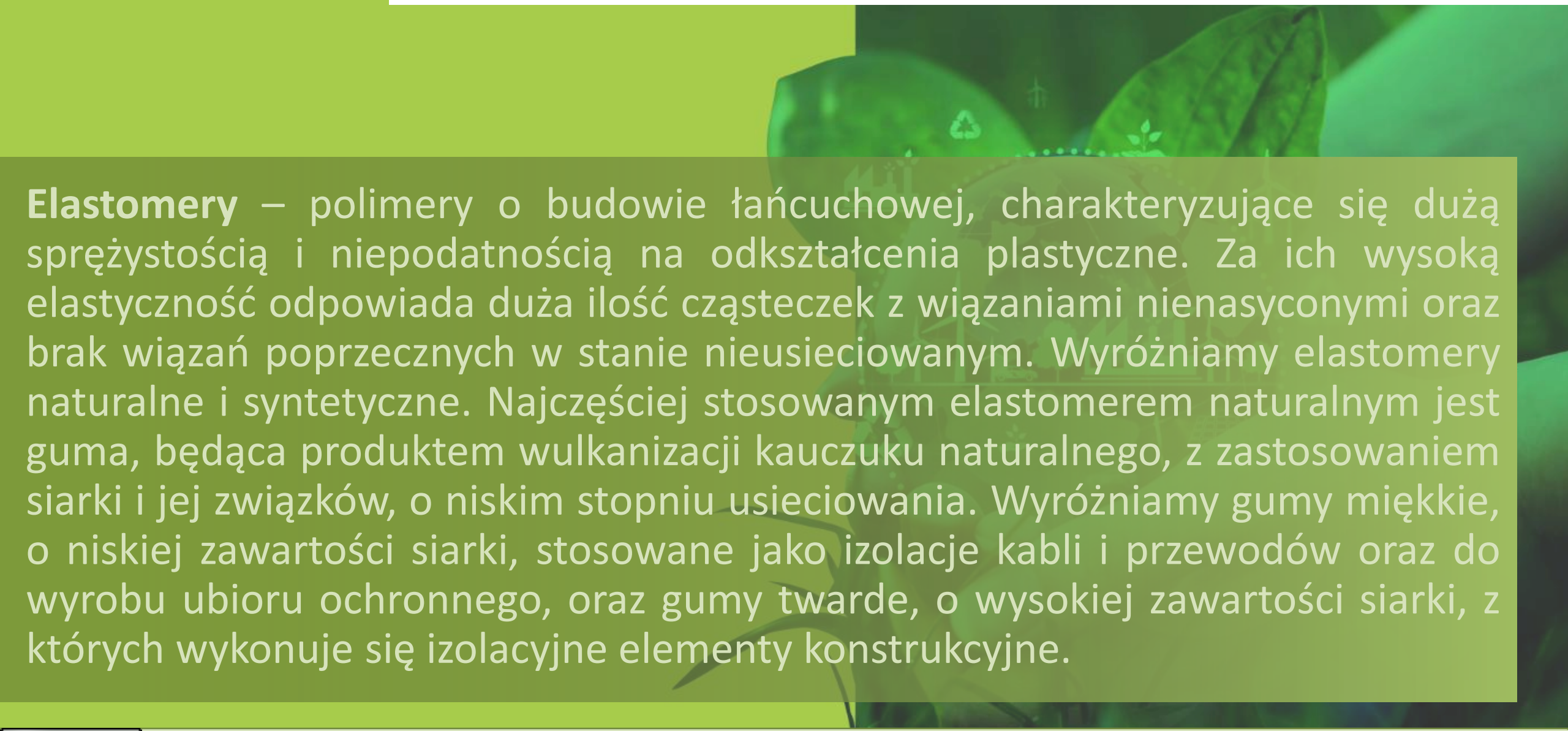
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Duroplasty – termoutwardzalne polimery organiczne, które pod wpływem reakcji chemicznych z utwardzaczami przechodzą ze stanu ciekłego do stałego. Stanowią liczną grupę żywic syntetycznych. Po podwyższeniu temperatury, w przeciwieństwie do termoplastów, nie ulegają uplastycznieniu. W elektrotechnice najczęściej stosowane są żywice epoksydowe i żywice poliestrowe. Charakteryzują się wysoką odpornością mechaniczną i termiczną.



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Elastomery – polimery o budowie łańcuchowej, charakteryzujące się dużą sprężystością i niepodatnością na odkształcenia plastyczne. Za ich wysoką elastyczność odpowiada duża ilość cząsteczek z wiązaniami nienasyconymi oraz brak wiązań poprzecznych w stanie nieusieciowanym. Wyróżniamy elastomery naturalne i syntetyczne. Najczęściej stosowanym elastomerem naturalnym jest guma, będąca produktem wulkanizacji kauczuku naturalnego, z zastosowaniem siarki i jej związków, o niskim stopniu usieciowania. Wyróżniamy gumy miękkie, o niskiej zawartości siarki, stosowane jako izolacje kabli i przewodów oraz do wyrobu ubioru ochronnego, oraz gumy twarde, o wysokiej zawartości siarki, z których wykonuje się izolacyjne elementy konstrukcyjne.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Materiały magnetyczne.

CC BY

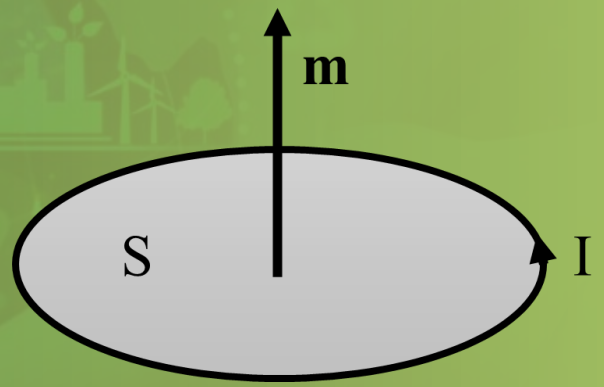
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Dipol magnetyczny to układ będący źródłem pola magnetycznego, posiadający dwa bieguny: północny (N) i południowy (S).

Podstawową wielkością opisującą dipol magnetyczny jest **moment magnetyczny** $\boldsymbol{m}$, który stanowi wektor określający zarówno kierunek, jak i wartość (siłę) dipola. Moment magnetyczny pętli przewodnika, przez którą przepływa prąd elektryczny, definiuje się najczęściej jako:

$$\boldsymbol{m} = \boldsymbol{IS}, [Am^2]$$

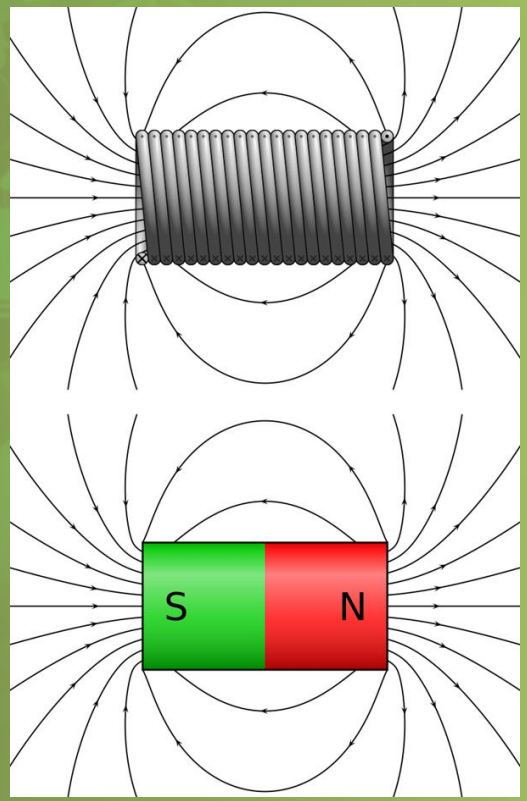


CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

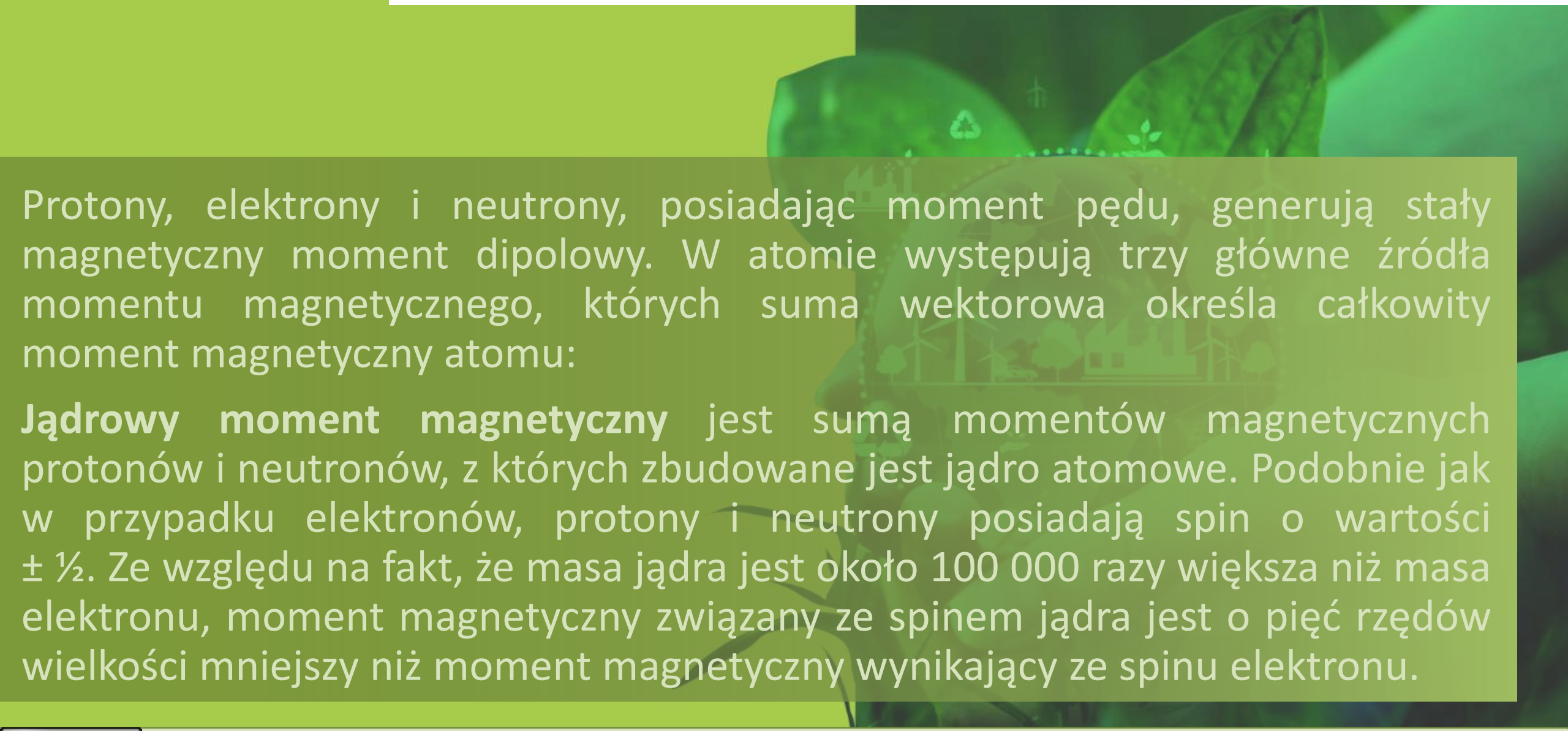
Gdzie: $\boldsymbol{S}$ – wektor powierzchniowy, I – natężenie prądu elektrycznego.

Pole magnetyczne to rodzaj pola fizycznego, które oddziałuje na obiekty posiadające właściwości magnetyczne, takie jak magnesy trwałe, materiały ferromagnetyczne oraz ładunki elektryczne będące w ruchu. Jeśli w obszarze pola magnetycznego znajdzie się materiał magnetyczny, doświadczy on siły, która będzie dążyła do zorientowania go zgodnie z kierunkiem linii sił pola magnetycznego.



CC BY

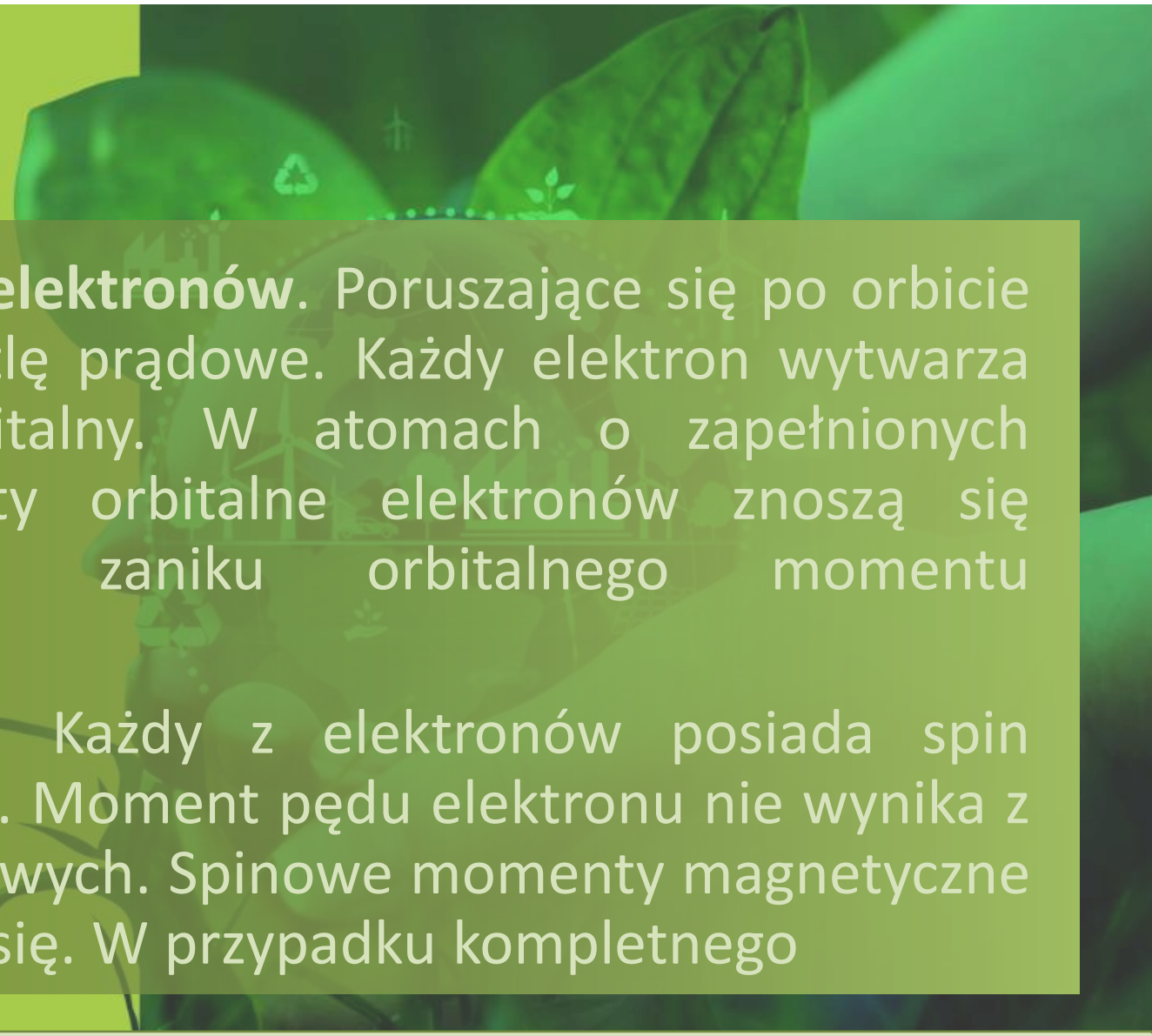
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Protony, elektrony i neutrony, posiadając moment pędu, generują stały magnetyczny moment dipolowy. W atomie występują trzy główne źródła momentu magnetycznego, których suma wektorowa określa całkowity moment magnetyczny atomu:

Jądrowy moment magnetyczny jest sumą momentów magnetycznych protonów i neutronów, z których zbudowane jest jądro atomowe. Podobnie jak w przypadku elektronów, protony i neutrony posiadają spin o wartości ± ½. Ze względu na fakt, że masa jądra jest około 100 000 razy większa niż masa elektronu, moment magnetyczny związany ze spinem jądra jest o pięć rzędów wielkości mniejszy niż moment magnetyczny wynikający ze spinu elektronu.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



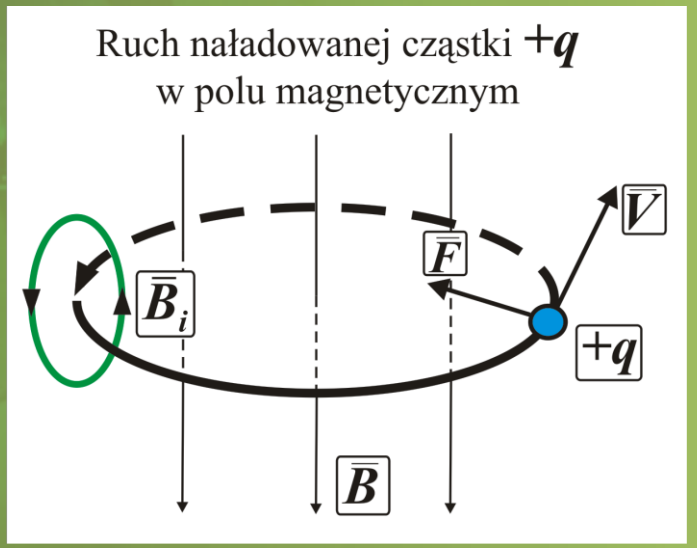
Orbitalne momenty magnetyczne elektronów. Poruszające się po orbicie elektrony można traktować jak pętlę prądowe. Każdy elektron wytwarza swój magnetyczny moment orbitalny. W atomach o zapełnionych powłokach magnetyczne momenty orbitalne elektronów znoszą się wzajemnie doprowadzając do zaniku orbitalnego momentu magnetycznego.

Spinowe momenty magnetyczne. Każdy z elektronów posiada spin związany z momentem pędu cząstki. Moment pędu elektronu nie wynika z jego obrotu, a z właściwości kwantowych. Spinowe momenty magnetyczne poszczególnych elektronów sumują się. W przypadku kompletnego

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

obsadzenia powłok ich suma równa się 0. Są głównym źródłem momentu magnetycznego cząstki i odgrywają kluczową rolę w magnetyzmie materii.

Gdy przemieszczająca się z prędkością **V** naładowana cząstka o ładu q znajdzie się w obrębie działania pola magnetycznego o indukcji **B** zacznie działać na nią siła **F**, skierowana prostopadle do wektora indukcji magnetycznej **B** i prędkości **V**. Efektem jest wprawienie naładowanej cząstki w ruch kołowy w płaszczyźnie prostopadłej do wektora



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

indukcji magnetycznej **B**. Kołowy ruch cząstki można intepretować jako pętlę prądową, która wytwarza pole magnetyczne o natężeniu $\mathbf{H}_i$ i indukcji $\mathbf{B}_i$. Podobne zjawisko zachodzi w atomach każdej substancji, na którą zaczyna działać zewnętrzne pole magnetyczne o indukcji **B**. Jeśli moment magnetyczny jest zgodny z kierunkiem indukcji **B** indukowany moment magnetyczny $\mathbf{B}_i$ ma kierunek przeciwny osłabiając moment magnetyczny elektronu **m**. Gdy wektor **B** jest przeciwny do kierunku **m** indukowany moment magnetyczny ma zwrot zgodny do kierunku **m** wzmacniając go. Skutkiem w obydwu przypadkach jest osłabienie działania zewnętrznego pola magnetycznego (osłabienie zgodnego **m**, bądź wzmocnienie przeciwnego).

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W przypadku niektórych atomów występuje silne niezrównoważenie momentów spinowych elektronów. Zjawisko to można wyjaśnić za pomocą **reguły Hunda**, która stwierdza, że elektrony zajmują najpierw orbitale o tej samej energii (tzw. orbitale zdegenerowane) w taki sposób, aby liczba niesparowanych elektronów była maksymalna, a ich spiny były zgodne.

Liczba atomowa	Nazwa	Symbol	K	L			M									N
			$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$		$3s^2$	$3p^6$			$3d^{10}$					$4s^2$
20	Wapń	Ca	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓					↑↓	↑↓
21	Skand	Sc	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑				↑↓	↑↓
22	Tytan	Ti	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑			↑↓	↑↓
23	Wanad	V	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑		↑↓	↑↓
24	Chrom	Cr	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
25	Mangan	Mn	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓
26	Żelazo	Fe	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑↓
27	Kobalt	Co	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑↓
28	Nikiel	Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓
29	Miedź	Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑
30	Cynk	Zn	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓

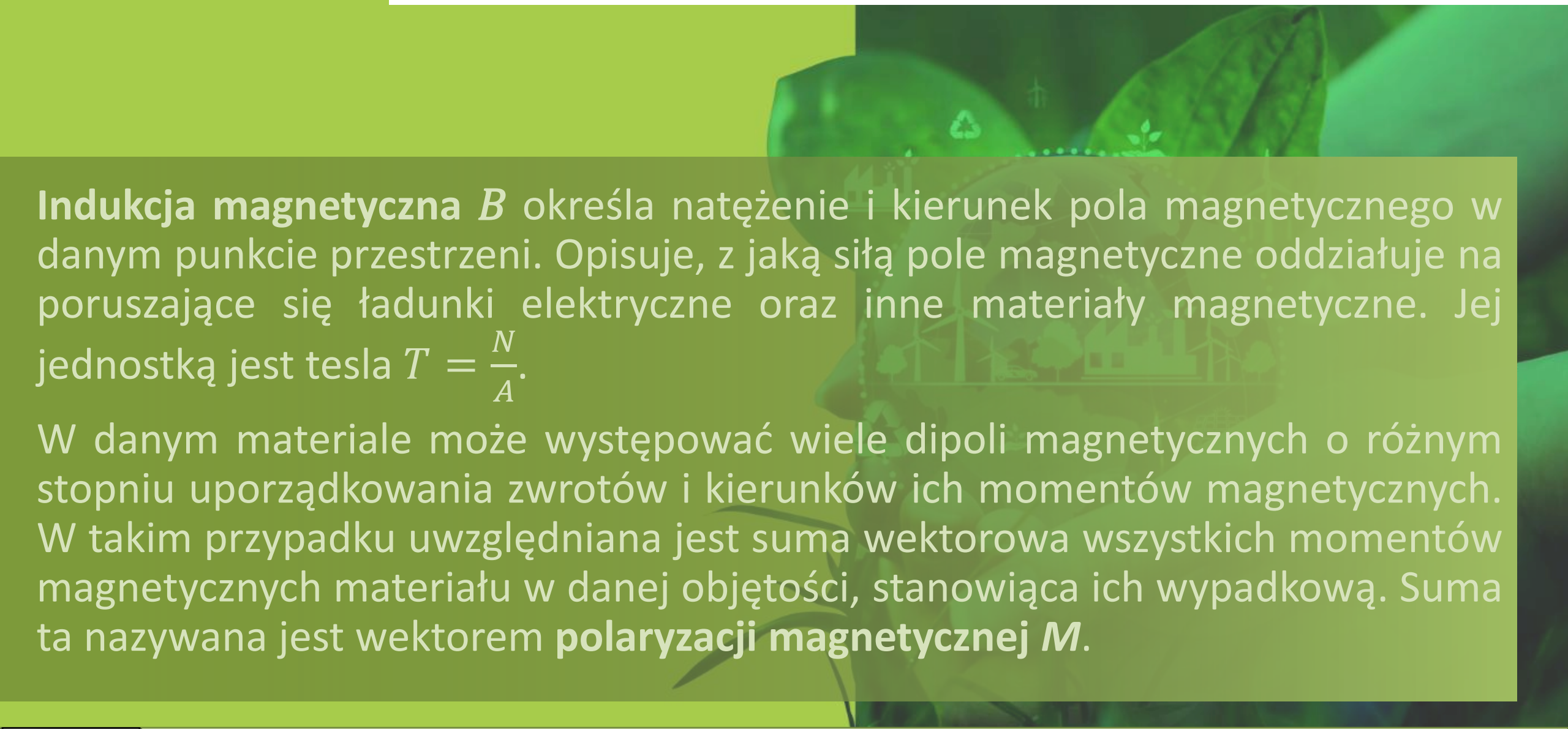
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Natężenie pola magnetycznego H jest wielkością wektorową charakteryzującą źródło pola magnetycznego. Jest ono niezależne od właściwości magnetycznych ośrodka. Jego jednostką jest A/m. Przepływający przez cewkę prąd elektryczny powoduje powstanie w jej wnętrzu pola magnetycznego o natężeniu:

$$H = \frac{nI}{l}, \left[\frac{A}{m}\right]$$

Gdzie: n – liczba zwoi cewki, I – natężenie prądu elektrycznego, l – długość cewki.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Indukcja magnetyczna B określa natężenie i kierunek pola magnetycznego w danym punkcie przestrzeni. Opisuje, z jaką siłą pole magnetyczne oddziałuje na poruszające się ładunki elektryczne oraz inne materiały magnetyczne. Jej jednostką jest tesla $T = \frac{N}{A}$.

W danym materiale może występować wiele dipoli magnetycznych o różnym stopniu uporządkowania zwrotów i kierunków ich momentów magnetycznych. W takim przypadku uwzględniana jest suma wektorowa wszystkich momentów magnetycznych materiału w danej objętości, stanowiąca ich wypadkową. Suma ta nazywana jest wektorem **polaryzacji magnetycznej *M***.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

$$\boldsymbol{M} = \lim_{V \to 0} \frac{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{m}_i}{V}, \left[\frac{\mathrm{Vs}}{m^2}\right]$$

Gdzie: V – objętość materiału, n – liczba atomów w objętości V, $\boldsymbol{m}_i$ – moment magnetyczny i-tej cząsteczki (atomu).

Wektor polaryzacji magnetycznej zależny jest od natężenia pola magnetycznego:

$$\boldsymbol{M} = \eta \mu_0 \boldsymbol{H}$$

Gdzie: μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni (μ_0=$4\pi \cdot 10^{-7}$, $[H/m]$), η – podatność magnetyczna materiału, $\boldsymbol{H}$ – natężenie pola magnetycznego.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W próżni wektor indukcji magnetycznej określany jest jako:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H}$$

W ośrodku, w którym dochodzi do magnetyzacji, wektor indukcji określany jest jako:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} + \boldsymbol{M} = \mu_0 \boldsymbol{H} + \eta \mu_0 \boldsymbol{H} = \mu_0 (1 + \eta) \boldsymbol{H}$$

Przyjmując, że:

$$\mu_r = (1 + \eta)$$

Otrzymujemy:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \mu_r \boldsymbol{H}$$

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Gdzie: μ_r – względna przenikalność magnetyczna.

Przenikalność magnetyczna względna μ_r jest jedną z trzech stałych materiałowych, które wchodzą do równań Maxwella. Na jej podstawie możemy podzielić materiały na trzy grupy:

Diamagnetyki, dla których $\mu_r < 1$

Paramagnetyki, dla których $\mu_r > 1$

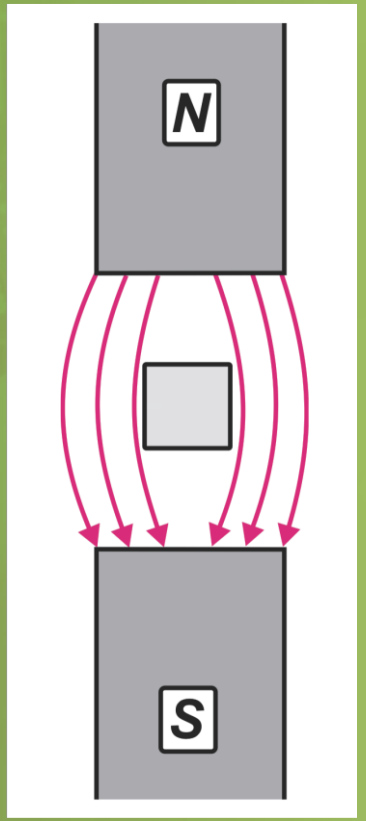
Ferromagnetyki, dla których $\mu_r >> 1$

Liczba atomowa	Nazwa	Symbol	M					N	Względna przenikalność magnetyczna
			$3d^{10}$					$4s^2$	
20	Wapń	Ca						↑↓	~0,99994
21	Skand	Sc	↑					↑↓	~1,0000008
22	Tytan	Ti	↑	↑				↑↓	~1,00005
23	Wanad	V	↑	↑	↑			↑↓	~1,00015
24	Chrom	Cr	↑	↑	↑	↑	↑	↑	~1,0009
25	Mangan	Mn	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓	~1,00014
26	Żelazo	Fe	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑↓	>4000
27	Kobalt	Co	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑↓	600*
28	Nikiel	Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓	250*
29	Miedź	Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	~0,999994
30	Cynk	Zn	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	~0,99998

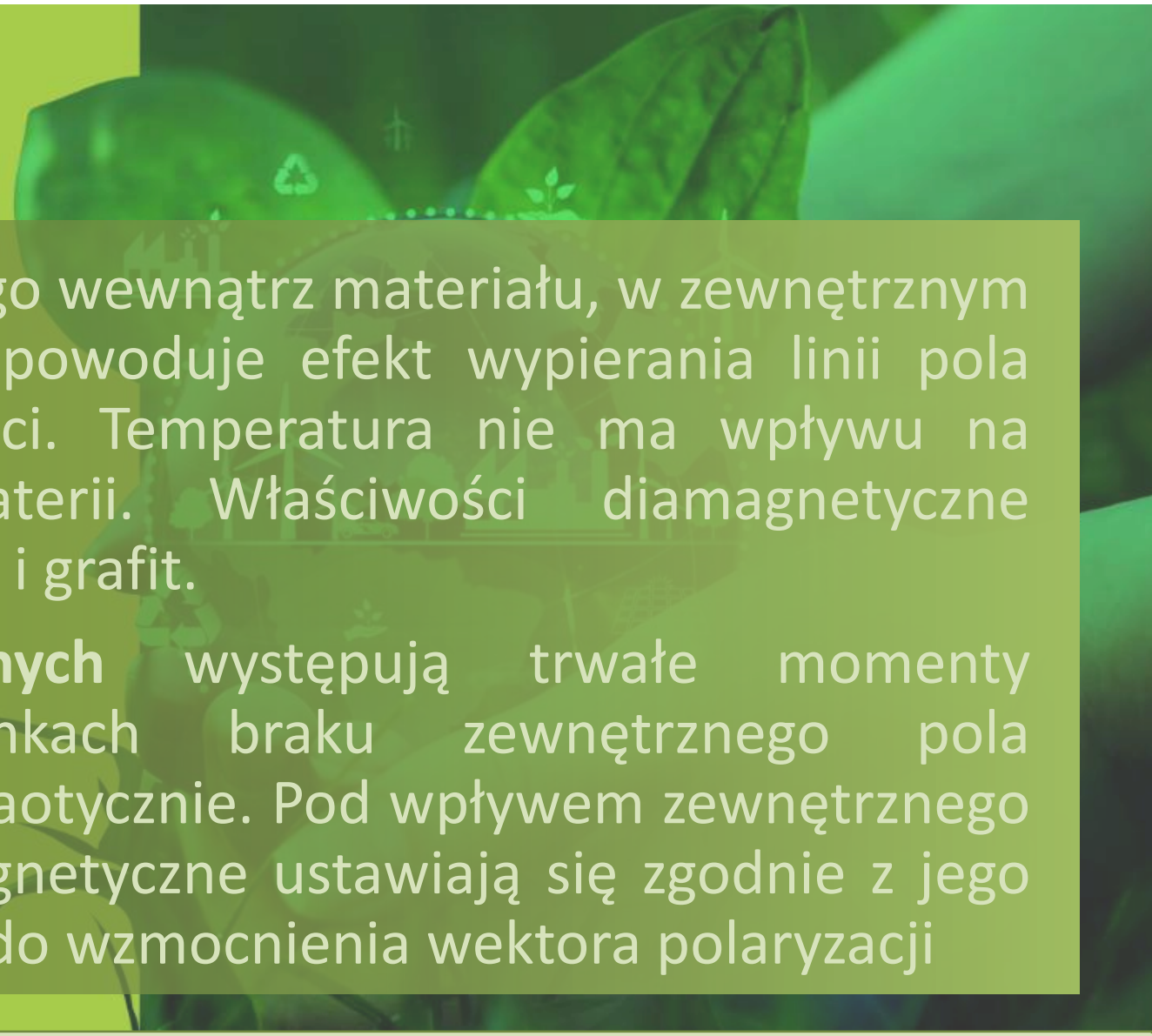
*wartość średnia

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Diamagnetyki są materiałami, które nie posiadają trwałych momentów dipolowych. Ich względna przenikalność magnetyczna przyjmuje wartości nieznacznie mniejsze od 1. Jest to spowodowane zjawiskiem indukowanego momentu dipolowego, który osłabia działanie zewnętrznego pola magnetycznego. Na diamagnetyk umieszczony w polu magnetycznym działa siła skierowana od obszaru o wyższym natężeniu pola magnetycznego do obszaru o niższym natężeniu. Powoduje to wypychanie materiału z obszaru silnej indukcji pola magnetycznego do obszaru o słabszej indukcji.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Z racji osłabiania pola magnetycznego wewnątrz materiału, w zewnętrznym polu magnetycznym diamagnetyk powoduje efekt wypierania linii pola magnetycznego ze swojej objętości. Temperatura nie ma wpływu na właściwości diamagnetyczne materii. Właściwości diamagnetyczne posiadają m.in.: woda, złoto, bizmut i grafit.

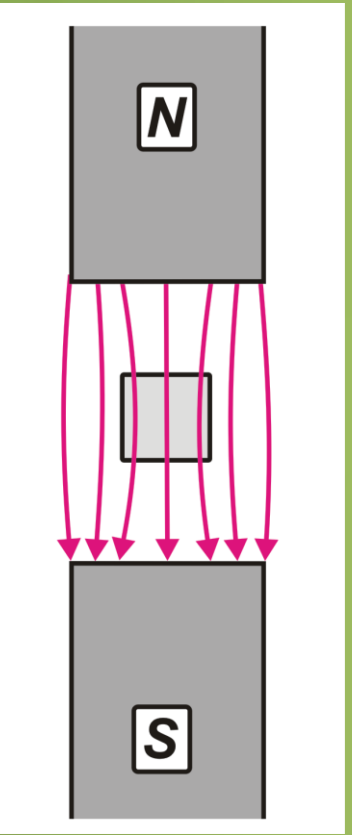
W materiałach **paramagnetycznych** występują trwałe momenty magnetyczne, które w warunkach braku zewnętrznego pola magnetycznego są zorientowane chaotycznie. Pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego momenty magnetyczne ustawiają się zgodnie z jego kierunkiem i zwrotem, co prowadzi do wzmocnienia wektora polaryzacji

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

magnetycznej, a w konsekwencji do wzrostu przenikalności magnetycznej. Wzrost temperatury powoduje nasilenie ruchów cieplnych, które negatywnie wpływają na stopień uporządkowania dipoli pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Dla słabych pól magnetycznych oraz temperatur zbliżonych do temperatury pokojowej można przyjąć, że wektor polaryzacji magnetycznej M materiału paramagnetycznego jest proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego i odwrotnie proporcjonalny do temperatury.

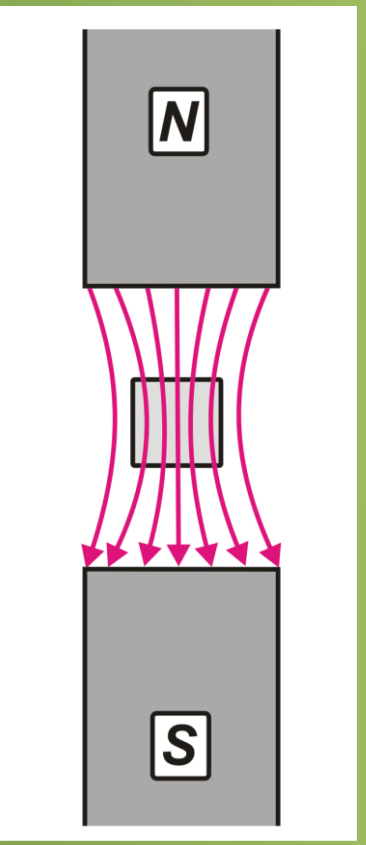
Właściwości paramagnetyczne posiadają: tlen, sód, platyna,



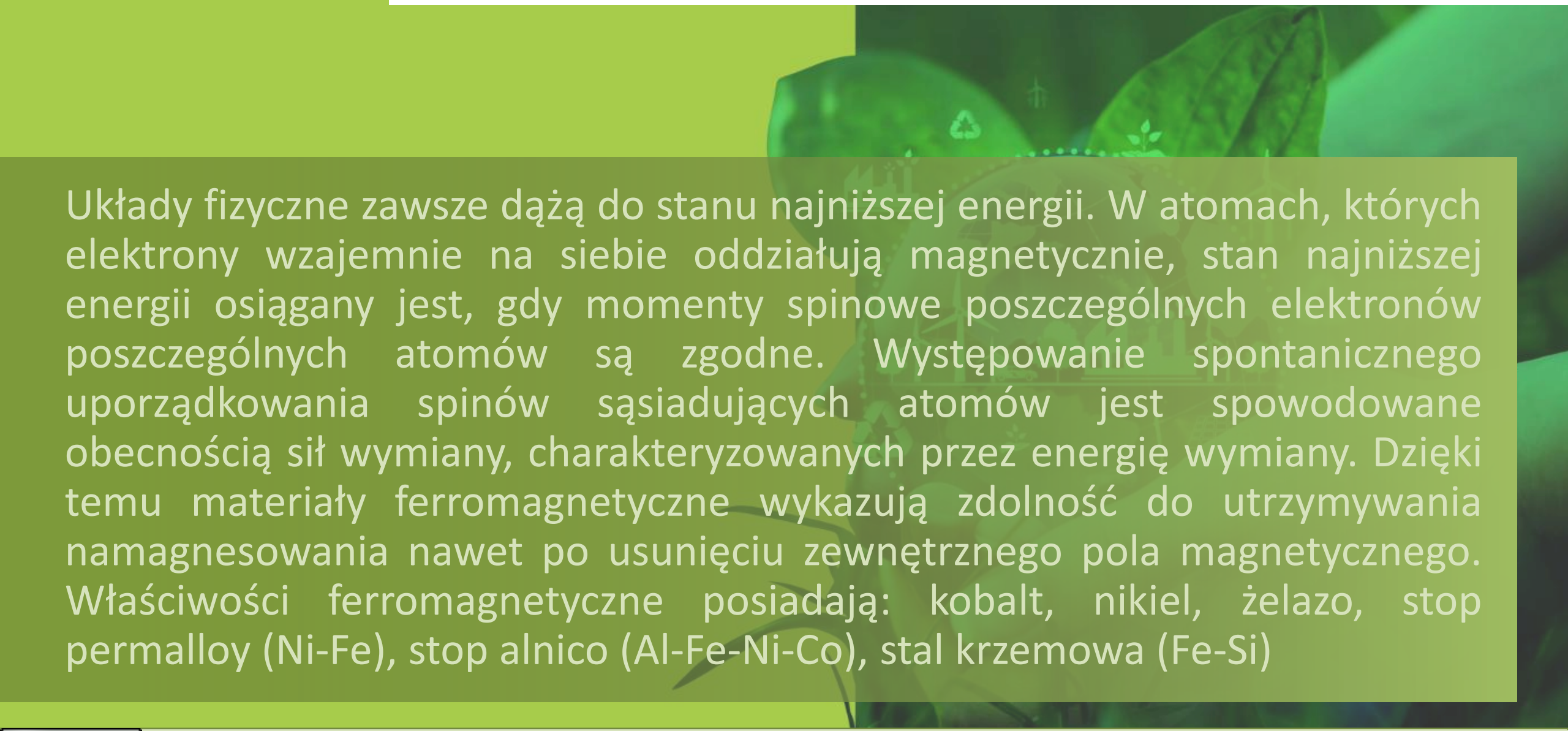
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

aluminium.

Materiały **ferromagnetyczne** charakteryzują się znacznymi wartościami przenikalności magnetycznej. Aby mogło wystąpić zjawisko ferromagnetyzmu, w materiale muszą znajdować się nieskompensowane spinowe momenty magnetyczne. Ponadto w materiale muszą występować siły wymiany o odpowiednio wysokiej wartości. W ferromagnetykach występuje wzajemny wpływ atomów na ich właściwości magnetyczne. Zjawiska takiego nie obserwujemy w paramagnetykach i diamagnetykach.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

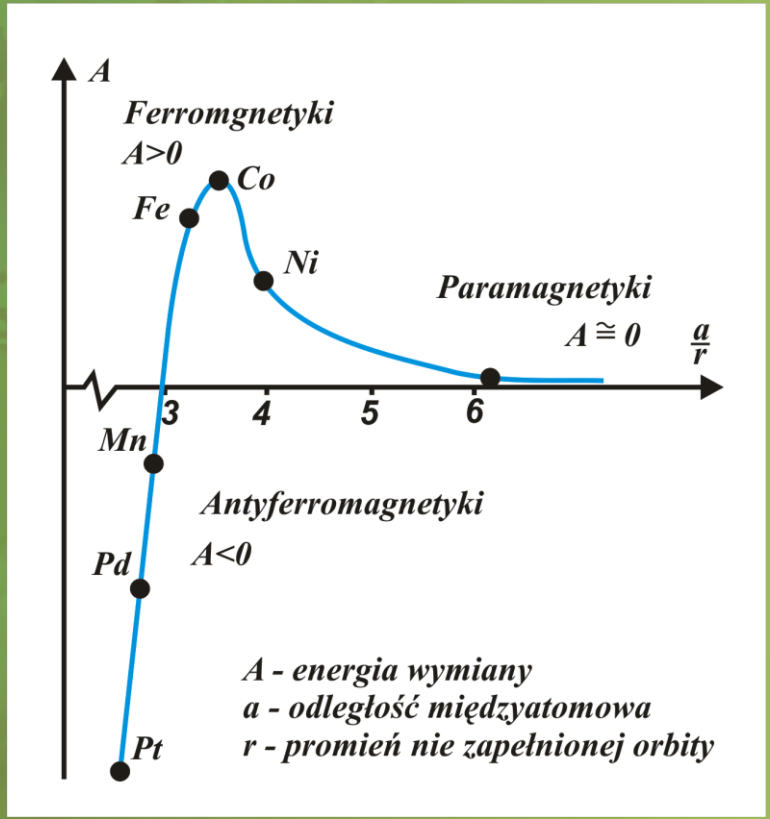


Układy fizyczne zawsze dążą do stanu najniższej energii. W atomach, których elektrony wzajemnie na siebie oddziałują magnetycznie, stan najniższej energii osiągany jest, gdy momenty spinowe poszczególnych elektronów poszczególnych atomów są zgodne. Występowanie spontanicznego uporządkowania spinów sąsiadujących atomów jest spowodowane obecnością sił wymiany, charakteryzowanych przez energię wymiany. Dzięki temu materiały ferromagnetyczne wykazują zdolność do utrzymywania namagnesowania nawet po usunięciu zewnętrznego pola magnetycznego. Właściwości ferromagnetyczne posiadają: kobalt, nikiel, żelazo, stop permalloy (Ni-Fe), stop alnico (Al-Fe-Ni-Co), stal krzemowa (Fe-Si)

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Siły wymiany to kwantowe oddziaływania między spinami elektronów w materiale, które decydują o tym, jak te spiny się względem siebie ustawiają. Wartości sił wymiany są ściśle związane z odległościami, w jakich znajdują się atomy danego materiału. W przypadku dużych odległości pomiędzy atomami energia wymiany jest mała, a materiał posiada właściwości paramagnetyczne. Wraz ze zmniejszaniem odległości pomiędzy atomami wzrastają siły



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

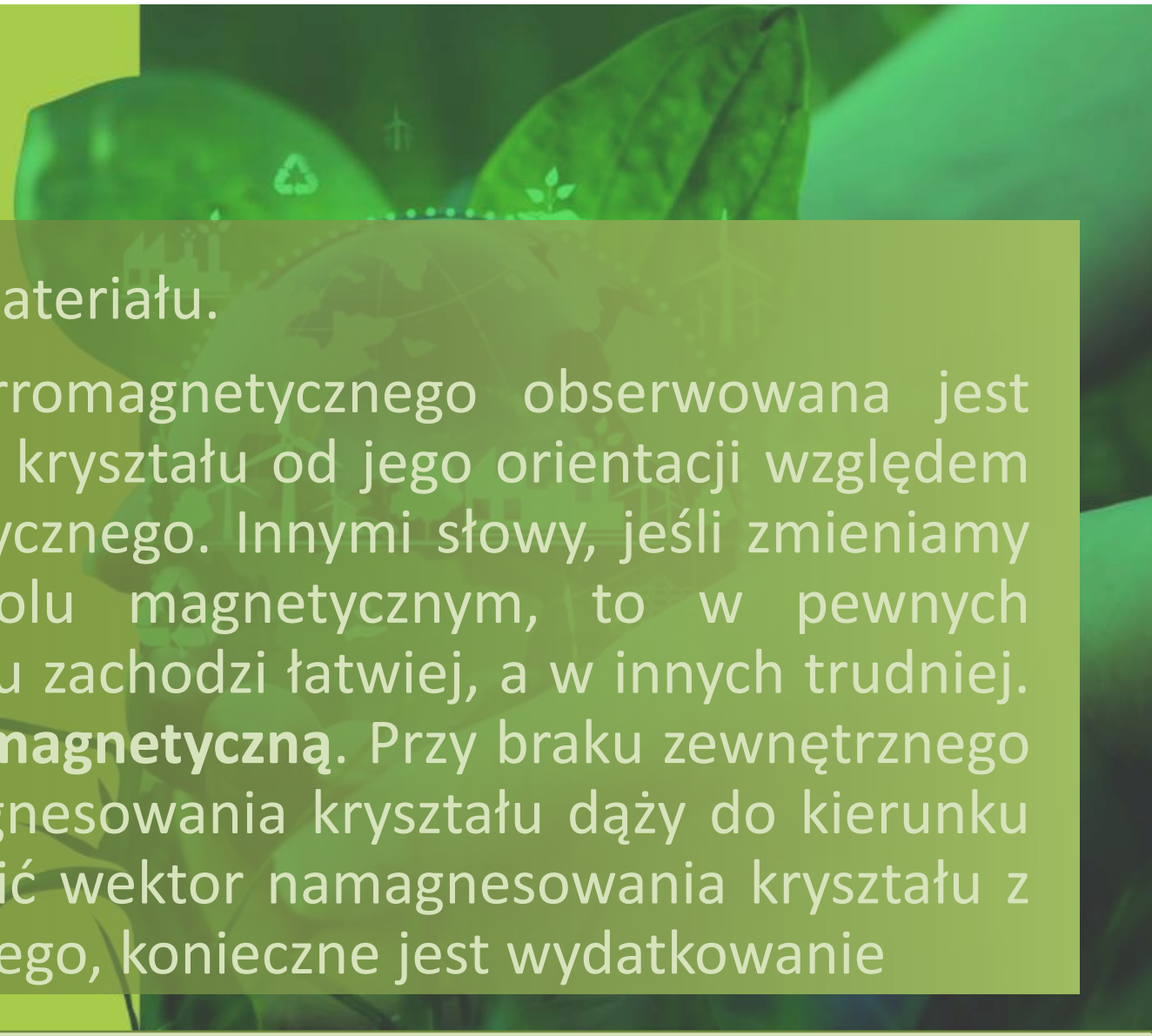
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

wymiany, co prowadzi do spontanicznego uporządkowania spinowych momentów magnetycznych elektronów sąsiadujących atomów i wystąpienia ferromagnetyzmu. Dalsze zmniejszanie odległości pomiędzy atomami prowadzi do ustawienia się spinów elektronów w przeciwnych kierunkach, energia wymiany przyjmuje wartości ujemne, a materiał uzyskuje właściwości antyferromagnetyczne.

Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta energia drgań sieci krystalicznej ferromagnetyka. Po przekroczeniu charakterystycznej dla danego materiału temperatury, zwanej temperaturą Curie bądź punktem Curie, energia drgań cieplnych jest na tyle duża, że doprowadza do całkowitego zaniku

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



spontanicznego namagnesowania materiału.

W monokryształach materiału ferromagnetycznego obserwowana jest zależność stopnia namagnesowania kryształu od jego orientacji względem działającego na niego pola magnetycznego. Innymi słowy, jeśli zmieniamy położenie kryształu w stałym polu magnetycznym, to w pewnych kierunkach magnesowanie materiału zachodzi łatwiej, a w innych trudniej. Zjawisko to nazywamy **anizotropią magnetyczną**. Przy braku zewnętrznego pola magnetycznego wektor namagnesowania kryształu dąży do kierunku łatwego magnesowania. Aby zmienić wektor namagnesowania kryształu z kierunku łatwego do kierunku trudnego, konieczne jest wydatkowanie

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

energii, zwanej energią anizotropii magnetokrystalicznej.

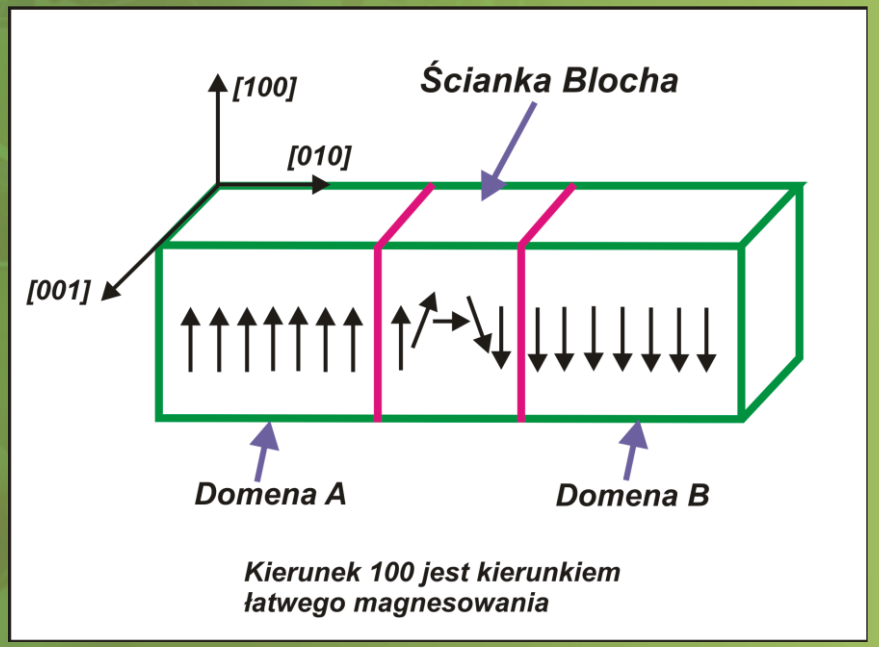
Każdy układ fizyczny dąży do stanu najniższej energii. Przy braku zewnętrznego pola magnetycznego dipole magnetyczne w materiale przyjmują takie orientacje, aby sumaryczna energia magnetyczna (pochodząca z różnych źródeł) była jak najmniejsza. Skutkiem tego jest powstanie w materiale uporządkowanych obszarów, w których pod wpływem sił wymiany spinowe momenty magnetyczne są ułożone w tym samym kierunku, zgodnym z kierunkiem łatwego magnesowania kryształu. Obszary te nazywamy **domenami magnetycznymi** bądź **obszarami Weissa**.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Domeny magnetyczne mają rozmiary rzędu 10^{-5} do 10^{-4} m.

Sąsiadujące ze sobą domeny magnetyczne, w których występują zgodne wektory namagnesowania, oddzielone są obszarami, w których następuje stopniowa zmiana kierunku magnesowania. Obszary te nazywamy **ściankami Blocha**. Przyjmują one rozmiary w zakresie od 10^{-8} do 10^{-7} m.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

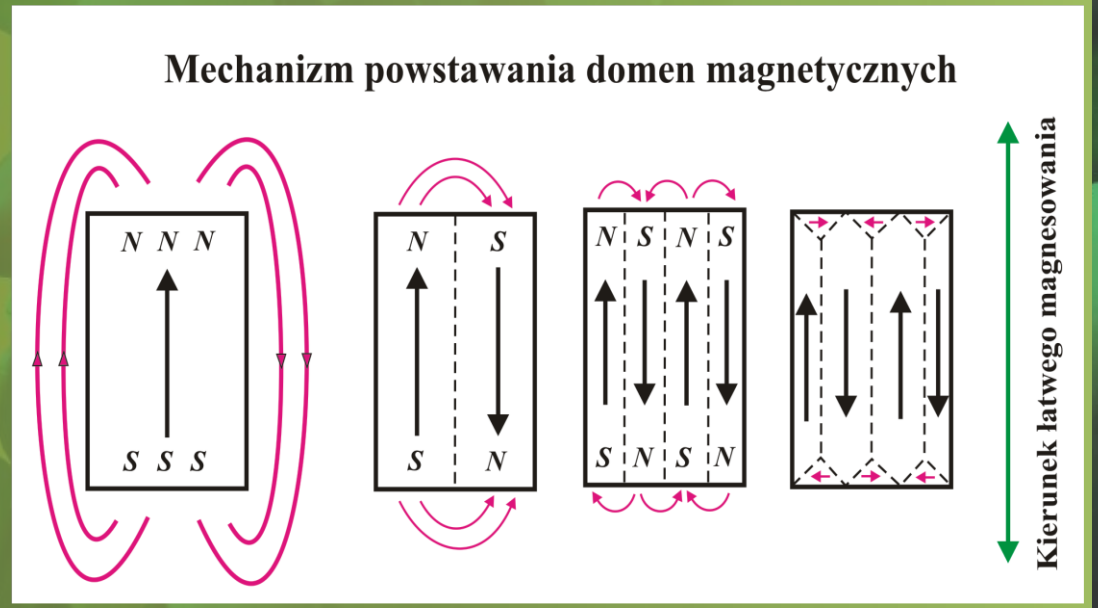
Energia wewnętrzna określająca rozmiary i właściwości struktury domenowej składa się z czterech składników:

- energii wymiany – wynikającej z wzajemnych oddziaływań spinów, która dąży do uporządkowania momentów magnetycznych,
- energii magnetostatycznej – będącej miarą energii zewnętrznego pola magnetycznego wytwarzanego przez domeny magnetyczne,
- energii anizotropii magnetokrystalicznej – wynikającej z ustawienia momentów magnetycznych względem kierunku „łatwego” magnesowania,

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

- energii ścian Blocha – energii potrzebnej do utworzenia granic między domenami.

Z perspektywy energii wymiany i anizotropii magnetokrystalicznej układ osiąga minimum energii, gdy cały materiał tworzy pojedynczą domenę magnetyczną, której kierunek momentu magnetycznego pokrywa się z kierunkiem łatwego magnesowania.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

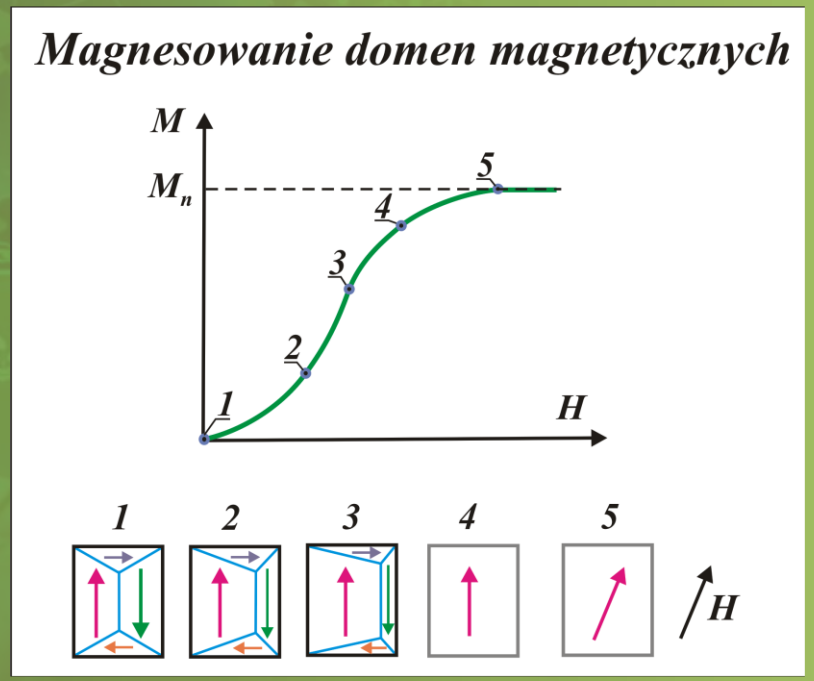
Jednocześnie w takiej sytuacji energia magnetostatyczna jest największa. Energia magnetostatyczna osiąga minimum, gdy domeny tworzą zamknięte obwody magnetyczne. Ostatecznie w materiale osiągana jest równowaga stanu najniższej energii pomiędzy rozmiarem domen (minimum energii wymiany) a jak najbardziej zamkniętymi obwodami magnetycznymi (minimum energii magnetostatycznej). Jednocześnie domeny ustawione niezgodnie z łatwym kierunkiem magnesowania zwiększają energię anizotropii magnetokrystalicznej. Dodatkowo, ze względu na występowanie wielu domen magnetycznych, wzrasta energia związana z dzielącymi je ściankami Blocha.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W rozmagnesowanym ferromagnetyku, przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, domeny układają się tak, aby utworzyć zamknięte obwody magnetyczne (stan najniższej energii).

W przypadku obecności zewnętrznego pola magnetycznego występuje proces magnesowania. Początkowo, przy niskich natężeniach pola magnetycznego, następuje zmiana rozmiarów domen. Ścianki Blocha



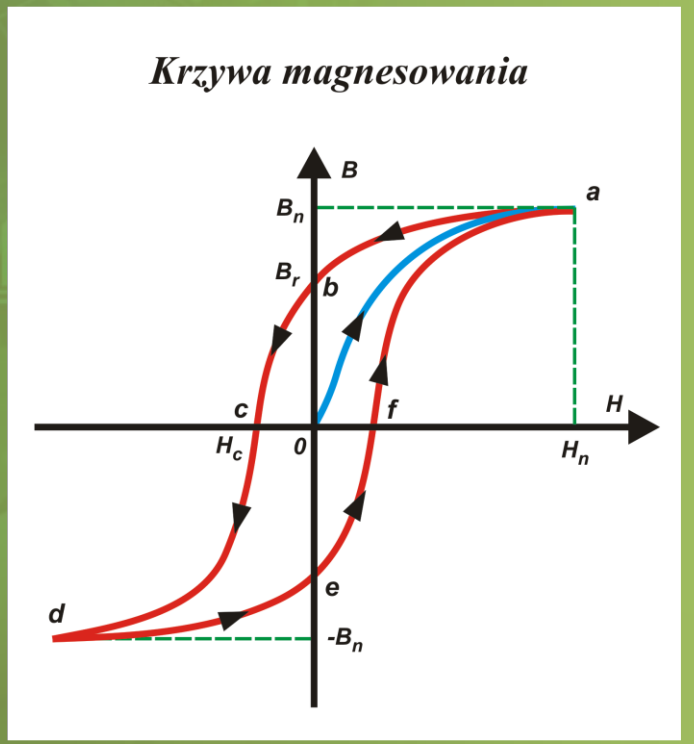
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

przesuwają się, powiększając domenę, której wektor magnetyczny jest zgodny z kierunkiem działającego pola. Przy większych natężeniach pola ścianki zanikają i następuje stopniowy obrót wektora namagnesowania ***M*** do kierunku działającego pola magnetycznego ***H***. Ostatecznie wektor namagnesowania pokrywa się co do kierunku z wektorem natężenia pola magnetycznego ***H***. Dalsze zwiększanie natężenia pola magnetycznego nie powoduje wzrostu stopnia namagnesowania materiału. Stan taki nazywamy **nasyceniem ferromagnetyka**. Po osiągnięciu nasycenia dalszy wzrost natężenia pola magnetycznego skutkuje jedynie zwiększeniem energii wewnętrznej materiału, a nie jego namagnesowania.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W przypadku gdy materiał nie posiada wcześniejszej historii magnesowania (np. materiał magnesowany jest po raz pierwszy), wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego ***H*** indukcja magnetyczna ***B*** zmienia się zgodnie z **pierwotną krzywą magnesowania** (niebieska krzywa na rysunku), aż do osiągnięcia stanu nasycenia, w którym dla maksymalnego natężenia pola magnetycznego H_m osiągana jest indukcja maksymalna B_m (punkt a). Jeśli w kolejnym etapie zmniejszymy natężenie pola



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

magnetycznego do zera, okaże się, że nowa krzywa magnesowania (zależność B od H) nie pokryje się z pierwotną krzywą magnesowania (punkt b). Mimo braku natężenia pola magnetycznego działającego na materiał, dalej będzie on posiadał pewną wartość indukcji magnetycznej B_r, zwaną indukcją szczątkową bądź remanencją magnetyczną. Aby doprowadzić do zaniku indukcji magnetycznej w materiale, konieczne jest przyłożenie pola magnetycznego o przeciwnym zwrocie. Jeśli źródłem pola magnetycznego jest cewka, osiągamy to poprzez zmianę polaryzacji jej zasilania. Wartość natężenia pola magnetycznego, przy którym indukcja magnetyczna osiąga wartość zera, nazywana jest natężeniem pola koercji

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

$-H_c$ (punkt c). Dalszy wzrost natężenia pola magnetycznego prowadzi do ponownego osiągnięcia indukcji nasycenia materiału o wartości $-B_m$ dla natężenia pola $-H_m$ (punkt d). Jeśli ponownie zmniejszymy natężenie pola magnetycznego do zera, w materiale pozostanie ponownie indukcja szczątkowa o wartości $-B_r$ (punkt e). Podobnie jak wcześniej, aby pozbawić materiał indukcji magnetycznej, konieczne jest przyłożenie pola magnetycznego o przeciwnym zwrocie i wartości H_c (punkt f). Dalszy wzrost natężenia pola magnetycznego prowadzi do ponownego wystąpienia stanu nasycenia materiału (punkt a). Obserwowany wpływ wcześniejszego magnesowania na aktualny proces magnesowania materiału nazywamy histerezą magnetyczną.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Pętla histerezy magnetycznej (gr. hysteresis – „pozostawać w tyle”) – krzywa opisująca zależność indukcji magnetycznej B od natężenia pola magnetycznego H, zależna od historii namagnesowania próbki.

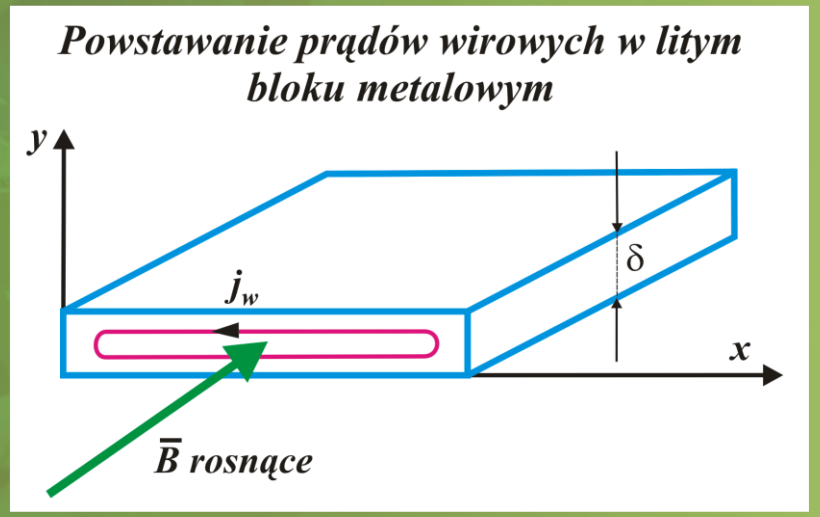
Proces magnesowania ferromagnetyka wymaga wydatkowania energii pola magnetycznego. Przy zaniku pola magnetycznego dochodzi do częściowego rozmagnesowania materiału do poziomu indukcji szczątkowej. Aby w pełni rozmagnesować materiał (B=0), konieczne jest wydatkowanie energii na zlikwidowanie zmian w strukturze domen magnetycznych, które zaszły w trakcie magnesowania. Energia wykorzystana do tego procesu jest tracona w postaci ciepła. Straty te nazywamy **stratami histerezowymi**.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Wartość strat histerezowych jest bezpośrednio proporcjonalna do powierzchni pętli histerezy. Straty te wyrażane są w dżulach na metr sześcienny materiału na jeden pełny cykl obiegu pętli histerezy. Ten typ strat jest proporcjonalny do częstotliwości pola magnetycznego oraz do kwadratu amplitudy indukcji magnetycznej.

Drugim rodzajem strat występujących w ferromagnetykach są **straty wiroprądowe**. Pod wpływem działającego pola magnetycznego



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

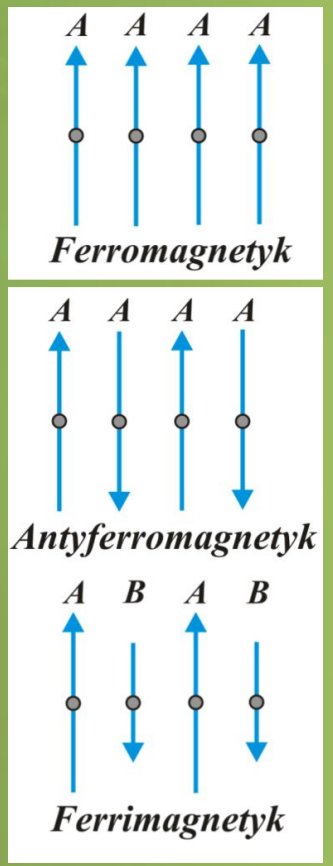
indukowany jest przepływ prądu elektrycznego w objętości ferromagnetyka. Przepływ prądów wirowych przez ferromagnetyk powoduje wydzielanie strat w postaci ciepła. W celu redukcji strat wiroprądowych dąży się do zwiększenia rezystywności ferromagnetyka poprzez wprowadzenie do niego domieszek. Inną metodą ograniczania strat wiroprądowych jest wykonywanie rdzeni ferromagnetycznych z blach pokrytych lakierami elektroizolacyjnymi zamiast litej konstrukcji. W zastosowaniach wysokoczęstotliwościowych często stosowaną metodą ograniczania strat wiroprądowych jest wykonywanie rdzeni ze sprasowanych proszków. Straty wiroprądowe rosną z kwadratem częstotliwości, indukcji magnetycznej i grubości rdzenia oraz są proporcjonalne do konduktywności materiału.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Gdy energia wymiany przyjmuje wartości ujemne może dojść do zjawisk antyferromagnetyzmu oraz ferrimagnetyzmu.

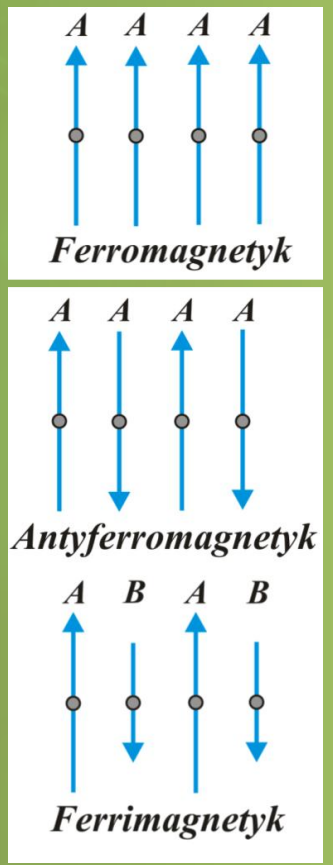
W przypadku **antyferromagnetyków**, w odróżnieniu od ferromagnetyków, momenty magnetyczne sąsiadujących atomów bądź jonów skierowane są przeciwnie. Wypadkowy moment magnetyczny takiego materiału jest zerowy. Przenikalność magnetyczna antyferromagnetyków jest nieznacznie wyższa od jedności. Powyżej temperatury Néela, ze względu na nasilające się drgania cieplne, antyrównoległe ułożenie spinów elektronów zanika, a materiał zachowuje się



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

jak paramagnetyk. Do antyferromagnetyków należą: CuO, CuMnAs, MnTe.

Ferrimagnetyki przypominają antyferromagnetyki pod względem układu spinów, tj. posiadają atomy o przeciwnie skierowanych momentach magnetycznych. Różnica polega na tym, że występują przynajmniej dwie populacje atomów o różnych wartościach wypadkowego momentu magnetycznego. Skutkiem tego jest niezerowy całkowity moment magnetyczny substancji. Przykładami ferrimagnetyków są: magnetyt (Fe_3O_4), $NiZnFe_2O_4$.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

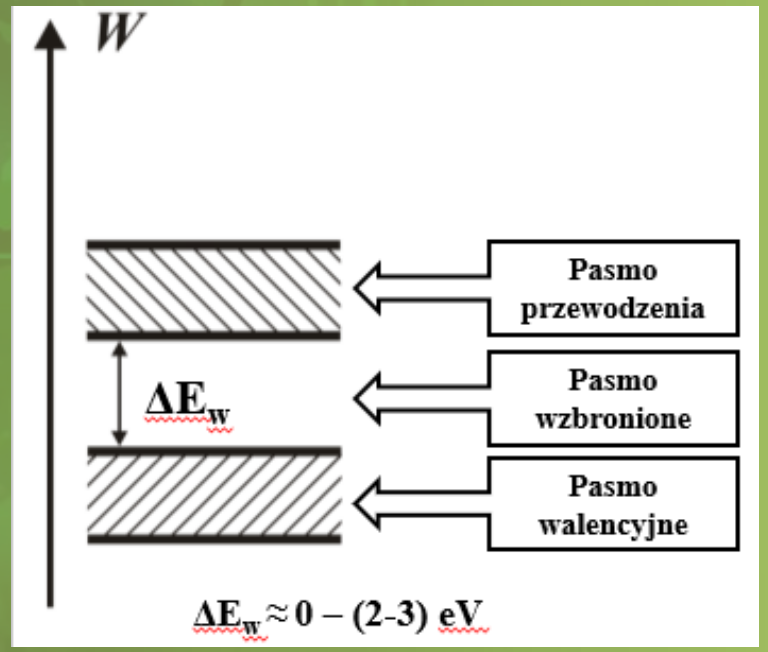
Materiały półprzewodnikowe.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Materiałami półprzewodzącymi nazywamy materiały, które pod względem konduktywności elektrycznej zajmują miejsce pomiędzy metalami a dielektrykami. Niewielka grupa spośród materiałów półprzewodzących może być wykorzystana do wytwarzania półprzewodników. **Półprzewodniki** charakteryzują się zazwyczaj budową krystaliczną oraz szerokością pasma wzbronionego w zakresie od 0 do 2–3 eV (choć istnieją od tej zasady wyjątki).



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Ze względu na zastosowane materiały, półprzewodniki możemy podzielić na:

- Elementarne – których strukturę tworzy jeden pierwiastek (np. Si, Ge).
- Złożone – o strukturze, na którą składają się związki chemiczne dwóch bądź więcej pierwiastków (np. InSb, SiC, GaAsP).

Ze względu na źródło nośników ładunku:

- Samoistne – które nie posiadają domieszek.
- Niesamoistne (domieszkowane) – wytwarzane poprzez wprowadzenie do struktury półprzewodnika domieszek, które znacząco zmieniają właściwości elektryczne materiału.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

W elektronice najszersze zastosowanie znalazły półprzewodniki należące do czwartej grupy okresowej pierwiastków (np. Ge, Si). W krzemie atomy budują sieć krystaliczną za pomocą wiązań kowalencyjnych czterech elektronów walencyjnych. W przeciwieństwie do metali elektrony walencyjne krzemu są relatywnie silnie związane z atomem, dlatego aby mogły wziąć udział w przewodnictwie, musi zostać dostarczona im energia $E_W \approx 1.11\, eV$, równa co do wartości szerokości pasma wzbronionego. Jeśli do półprzewodnika zostanie dostarczona energia wyższa bądź równa E_W następuje przejście elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Przeniesiony elektron staje się nośnikiem ładunku.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Z perspektywy ładunku elektrycznego atomy półprzewodnika są obojętne elektrycznie (liczba protonów jest równa liczbie elektronów). Po przejściu elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa w paśmie walencyjnym powstaje „puste miejsce” zwane **dziurą**. W miejscu występowania dziury brakuje elektronu aby uzyskać stan obojętności elektrycznej, co sprawia, że dziura posiada ładunek dodatni. Elektron walencyjny sąsiadującego atomu może przejść do atomu, w którym występuje dziura. Skutkiem tego jest zaniknięcie pierwotnej dziury przy jednoczesnym pojawieniu się dziury w atomie, z którego elektron przeskoczył. Kolejne przejścia elektronów powodują zmianę lokalizacji

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

dziury. Patrząc z perspektywy ładunku elektrycznego, ruch dziury (wywołany kolejnymi przeskokami elektronów) wygląda jak przemieszczanie się przez półprzewodnik dodatniego nośnika ładunku.

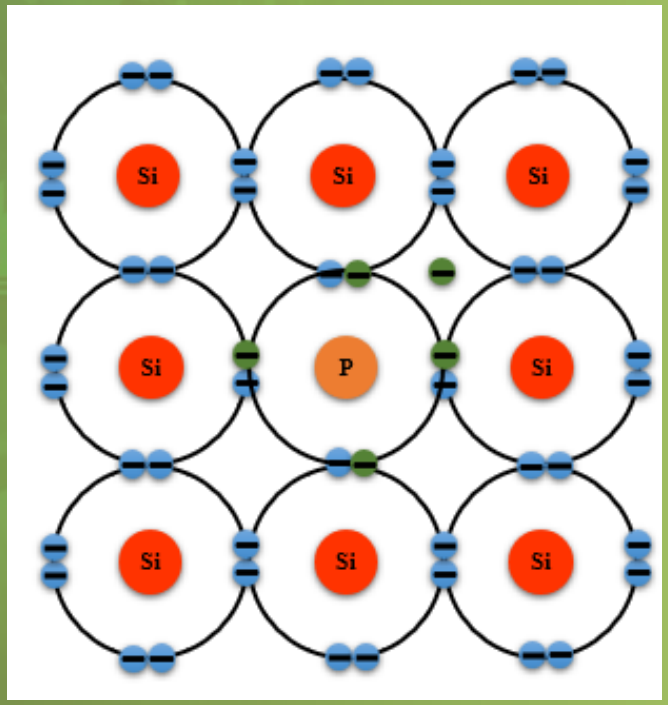
Ze względu na fakt, że w półprzewodniku samoistnym (bez domieszek) generacja nośników prowadzi do powstania par dziura-elektron, liczba dziur w paśmie walencyjnym jest równa liczbie elektronów w paśmie przewodnictwa.

Po przyłożeniu do półprzewodnika samoistnego pola elektrycznego płynie przez niego prąd elektryczny, który składa się z prądu elektronowego w paśmie przewodnictwa oraz prądu dziurowego w paśmie walencyjnym.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Aby zmienić właściwości elektryczne półprzewodnika samoistnego, wprowadza się do jego struktury domieszki. Jeśli do półprzewodnika należącego do czwartej grupy okresowej (np. Si) wprowadzimy domieszkę z piątej grupy okresowej (np. P, As, Sb, Bi), atom domieszki tworzy wiązania kowalencyjne z czterema sąsiadującymi atomami krzemu. Ze względu na budowę sieci krystalicznej krzemu piąty elektron walencyjny domieszki jest słabo związany. Z tego powodu potrzeba niewielkiej energii $E_D \approx 0.044\ eV$



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

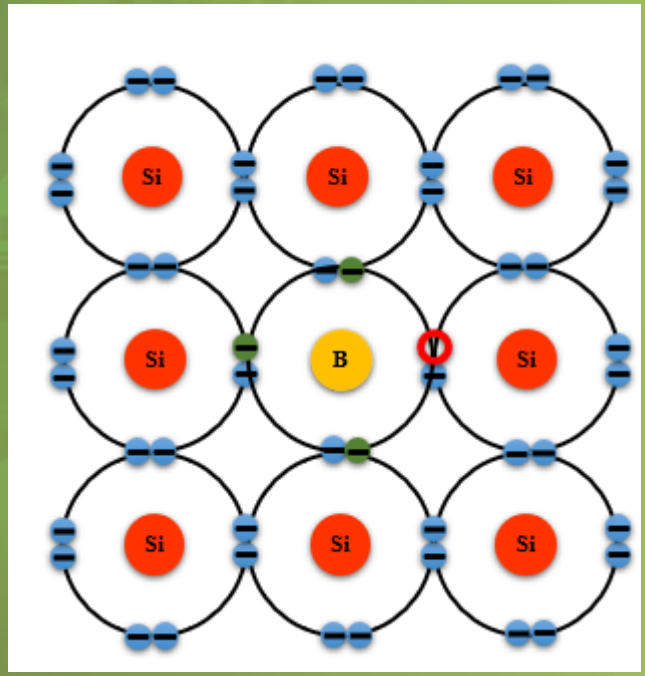
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

aby elektron atomu domieszki przeszedł do pasma przewodnictwa, stając się nośnikiem. Proces uwalniania bądź przyjmowania przez domieszkę elektronu nazywamy jonizacją domieszki, a niezbędną do niego energię – energią jonizacji domieszki. Domieszki, które uwalniają elektron, nazywamy **domieszkami donorowymi**. Półprzewodnik domieszkowany domieszką donorową nazywamy **półprzewodnikiem typu n**. Uwolnieniu elektronu domieszki nie towarzyszy powstanie dziury, dlatego w półprzewodniku typu n występuje przewaga liczby elektronów nad dziurami. W półprzewodniku typu n elektrony są nośnikami większościowymi, a dziury – nośnikami mniejszościowymi.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Jeżeli do półprzewodnika z czwartej grupy okresowej (np. Si) wprowadzimy domieszkę należącą do trzeciej grupy okresowej (np. B, Al, Ga, In), atom domieszki utworzy wiązanie kowalencyjne z trzema atomami krzemu. Ze względu na brak czwartego elektronu walencyjnego w atomie domieszki dąży ona do przyjęcia elektronu od sąsiadującego z nią krzemu. Jeśli elektron w sąsiadującym z domieszką krzemie osiągnie energię jonizacji domieszki (np. dla boru $E_D \approx 0.045\ eV$) następuje przejście elektronu z



CC BY

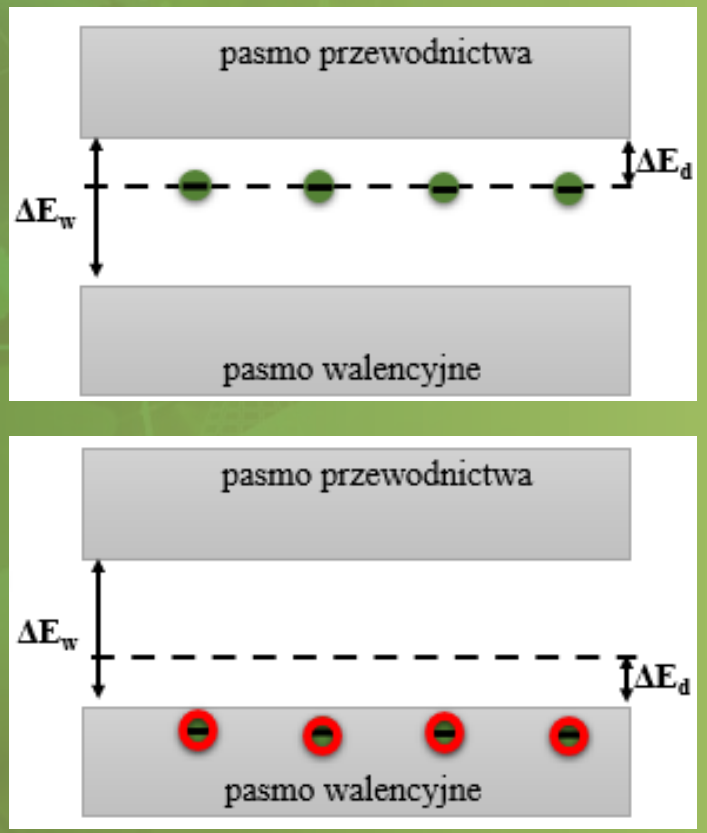
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

atomu krzemu do atomu domieszki, czego skutkiem jest powstanie dziury, która jest dodatnim nośnikiem ładunku. Domieszki, które przyjmują elektrony, nazywamy **domieszkami akceptorowymi**. Półprzewodnik domieszkowany domieszką akceptorową nazywamy **półprzewodnikiem typu p**. Przyjęciu przez domieszkę akceptorową elektronu, czego skutkiem jest powstanie dziury, nie towarzyszy uwolnienie elektronu do pasma przewodnictwa. Z tego powodu w półprzewodniku typu p występuje przewaga liczby dziur nad swobodnymi elektronami. W półprzewodniku typu p dziury są nośnikami większościowymi, a elektrony nośnikami mniejszościowymi.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Z perspektywy modelu pasmowego poziom energetyczny domieszki donorowej znajduje się tuż poniżej poziomu pasma przewodnictwa. Potrzebna jest więc niewielka ilość energii, aby domieszka uwolniła elektron do pasma przewodnictwa. W przypadku domieszki akceptorowej jej poziom energetyczny znajduje się tuż powyżej pasma walencyjnego, więc wymagana jest niewielka energia, aby elektron przeszedł z pasma walencyjnego na poziom domieszki, tworząc dziurę.

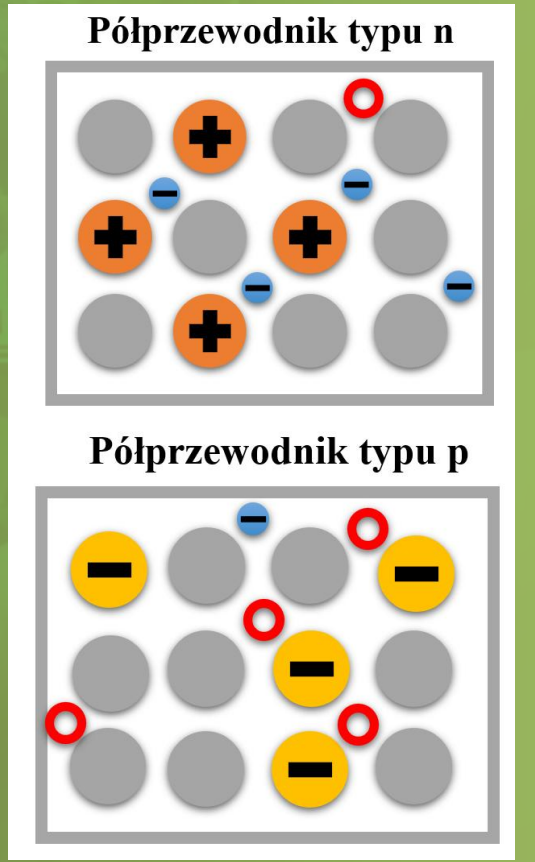


CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

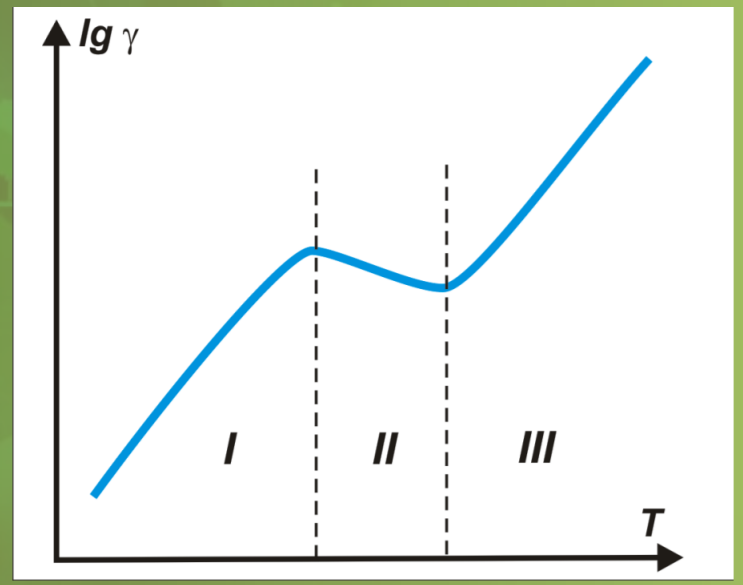
Elektrycznie obojętny atom domieszki donorowej, po uwolnieniu elektronu, który staje się swobodnym nośnikiem, przekształca się w jon dodatni. Podobnie elektrycznie obojętny atom domieszki akceptorowej, po przyjęciu elektronu, czego skutkiem jest powstanie dziury, przekształca się w jon ujemny.

Tym samym powstaniu każdego swobodnego nośnika ładunku na skutek jonizacji domieszki towarzyszy powstanie nieruchomego jonu o przeciwnym znaku.



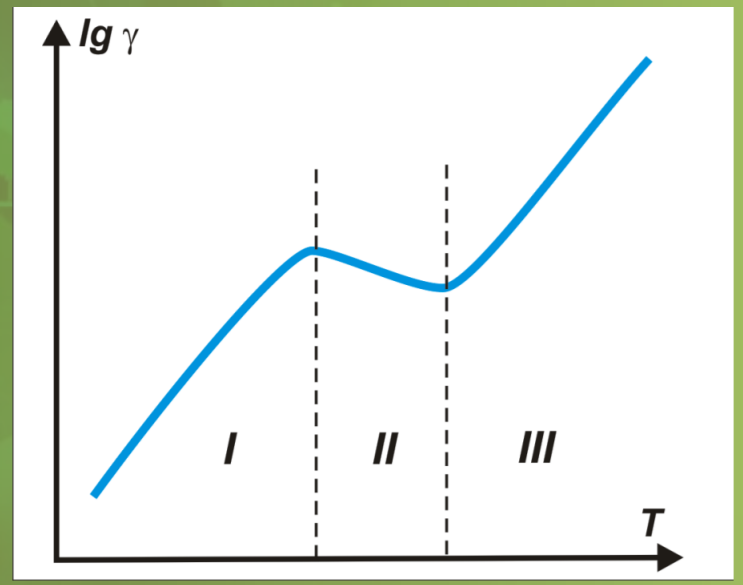
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Przewodność (konduktywność) półprzewodnika silnie zależy od temperatury. W zakresie niskich temperatur, wraz ze wzrostem temperatury, coraz więcej atomów domieszek zostaje zjonizowanych, co prowadzi do wzrostu przewodności (obszar I). Główną rolę w tym obszarze odgrywa konduktywność domieszkowa. Przy dalszym wzroście temperatury nie pojawiają się już nowe nośniki ładunku pod wpływem jonizacji domieszek. Jednocześnie, ze względu na coraz silniejsze drgania



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

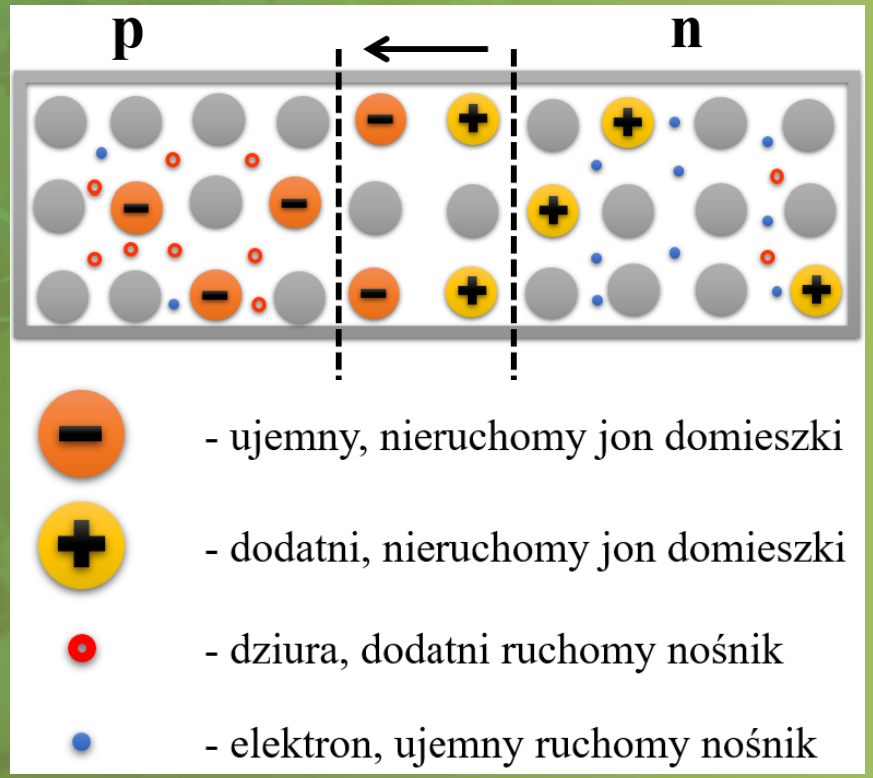
cieplne, maleje ruchliwość nośników, czego skutkiem jest spadek całkowitej konduktywności półprzewodnika (obszar II). Przy jeszcze wyższych temperaturach niektóre elektrony osiągają energię wystarczającą do przejścia z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Zachodzi generacja par elektron-dziura. Liczba nośników ładunku wzrasta, a co za tym idzie, wzrasta konduktywność. W tym obszarze główną rolę odgrywa konduktywność samoistna (obszar III).



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Złącze p-n – struktura powstająca na granicy styku półprzewodnika typu p z półprzewodnikiem typu n.

Pod wpływem dyfuzji elektrony z obszaru n przemieszczają się w kierunku obszaru p. Podobnie, pod wpływem dyfuzji, dziury z obszaru p przemieszczają się w kierunku obszaru n. W obszarze złącza elektrony napotykają dziury, co prowadzi do przejścia elektronu z pasma przewodnictwa do pasma



CC BY

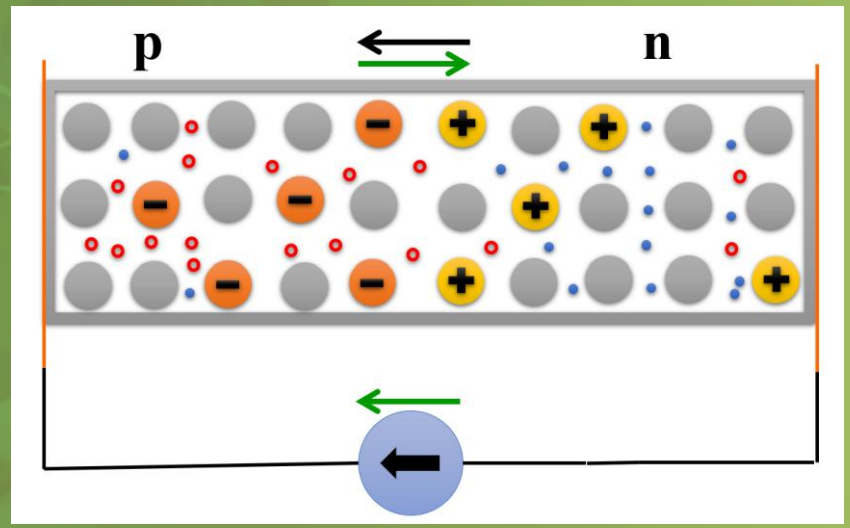
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

pasma walencyjnego, czego skutkiem jest zaniknięcie pary elektron-dziura. Zjawisko to nazywamy rekombinacją. W wyniku rekombinacji w obszarze złącza zanikają swobodne nośniki ładunku, tworząc tzw. **warstwę zaporową (obszar/warstwę zubożoną)**. Po zaniku elektronów i dziur w obszarze zubożonym pozostają nieruchome jony domieszek – o ładunku dodatnim po stronie półprzewodnika typu n i ujemnym po stronie półprzewodnika typu p. Jony te, ze względu na brak kompensujących ich ładunków elektronów i dziur, tworzą ładunek przestrzenny, który wytwarza wbudowane pole elektryczne będące barierą potencjału. Obecność bariery potencjału zapobiega dalszej dyfuzji nośników większościowych do obszaru złącza.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

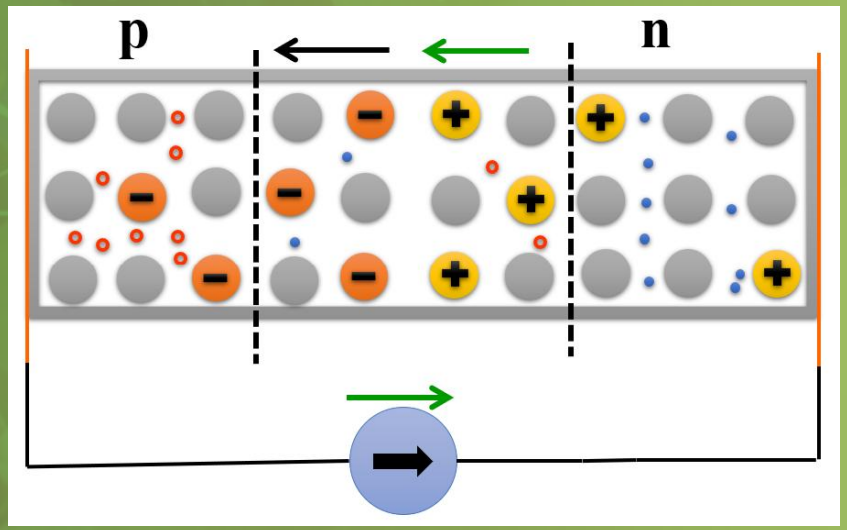
Polaryzacja w kierunku przewodzenia złącza p-n występuje, gdy do półprzewodnika typu p przyłączymy dodatni biegun źródła napięcia, a do półprzewodnika typu n – ujemny. Wraz ze wzrostem wartości napięcia następuje stopniowe zmniejszanie obszaru zubożonego. Gdy przyłożone napięcie osiąga wartość bariery potencjału, warstwa zaporowa zanika, czego skutkiem jest swobodny przepływ nośników ładunku przez złącze.



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

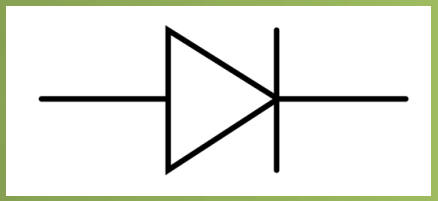
Polaryzacja w kierunku zaporowym złącza p-n występuje, gdy do półprzewodnika typu n przyłączymy dodatni biegun źródła napięcia, a do półprzewodnika typu p – ujemny. Wraz ze wzrostem przykładanego napięcia warstwa zubożona rozszerza się. Wzrasta natężenie niewielkiego prądu wstecznego nośników mniejszościowych, które nie są hamowane przez barierę potencjału.



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Podstawowym elementem półprzewodnikowym jest **dioda**. Zbudowana jest ona ze złącza p-n, do którego doprowadzono dwie elektrody: katodę do obszaru typu n oraz anodę do obszaru typu p. Idealna dioda półprzewodnikowa przewodzi prąd bezstratnie w kierunku przewodzenia, jednocześnie blokując przepływ prądu elektrycznego w kierunku zaporowym. W rzeczywistych diodach półprzewodnikowych występują straty energetyczne oraz niewielki prąd wsteczny, który zależy od rodzaju materiału półprzewodnikowego i temperatury.



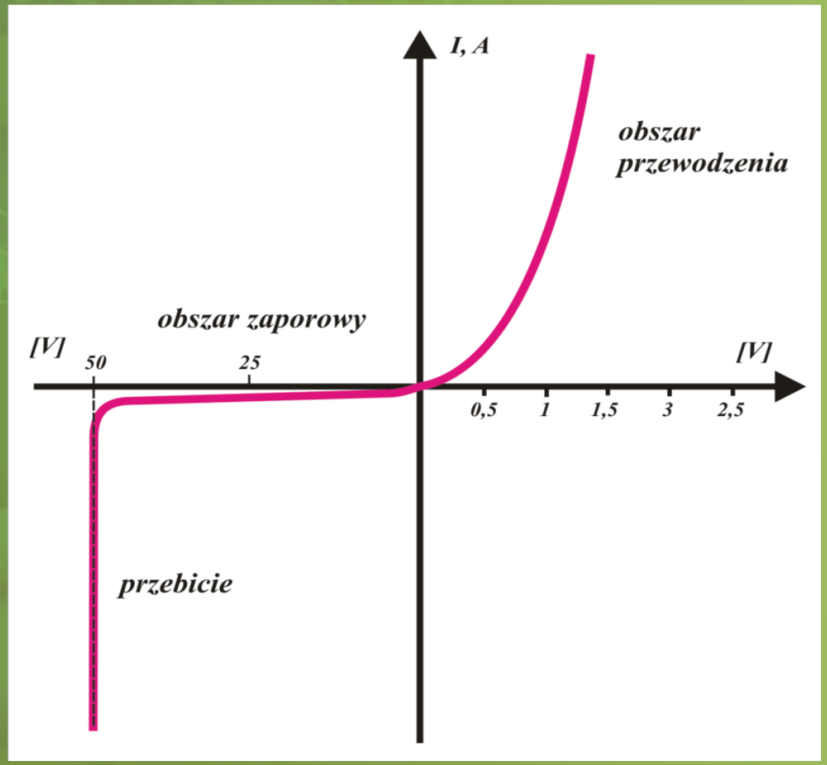
CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Charakterystyka prądowo-napięciowa diody półprzewodnikowej jest nieliniową zależnością, w której można wyróżnić trzy obszary.

Obszar przewodzenia – dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Wraz ze wzrostem napięcia początkowo natężenie prądu wzrasta nieznacznie. Po przekroczeniu napięcia progowego, wystarczającego do neutralizacji bariery potencjału złącza p-n, dioda zaczyna gwałtownie przewodzić prąd



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

elektryczny. Napięcie progowe diod krzemowych wynosi ok. 0,7 V, a dla diod germanowych ok. 0,3 V.

Obszar zaporowy – dioda jest spolaryzowana zaporowo. Przez diodę płyną niewielkie prądy wsteczne nośników mniejszościowych, których wartość wzrasta wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia.

Obszar przebicia – dalszy wzrost napięcia w kierunku zaporowym doprowadza do przebicia diody. Rozpędzane polem elektrycznym nośniki mniejszościowe osiągają energie wystarczające do zjonizowania obojętnych atomów krzemu. Gwałtownie wzrasta liczba nośników ładunku, a co za tym

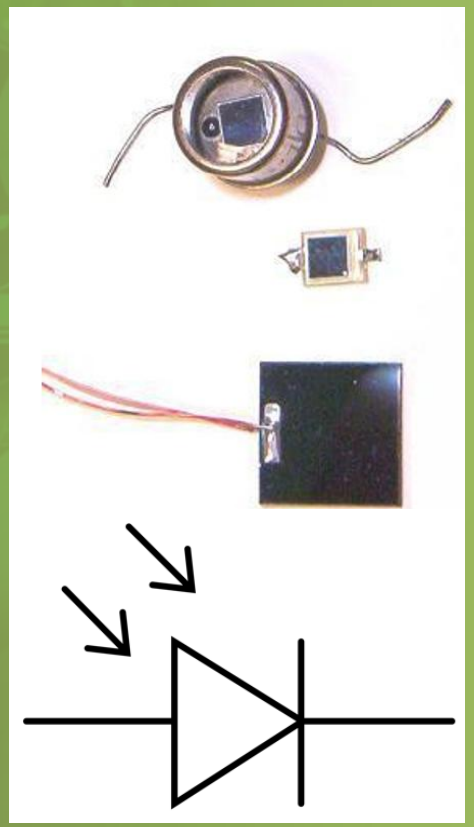
CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

idzie, zwiększa się natężenie prądu płynącego przez diodę. Ponieważ na diodzie odkłada się znaczny spadek napięcia, przy przepływie prądu o dużej wartości wydziela się duża ilość mocy w postaci ciepła. Wysoka temperatura może nieodwracalnie uszkodzić element. Zazwyczaj doprowadzanie diody do przebicia jest niepożądane. Wyjątkiem są diody Zenera, wykorzystywane jako stabilizatory napięcia, które są zaprojektowane do pracy w warunkach przebicia.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

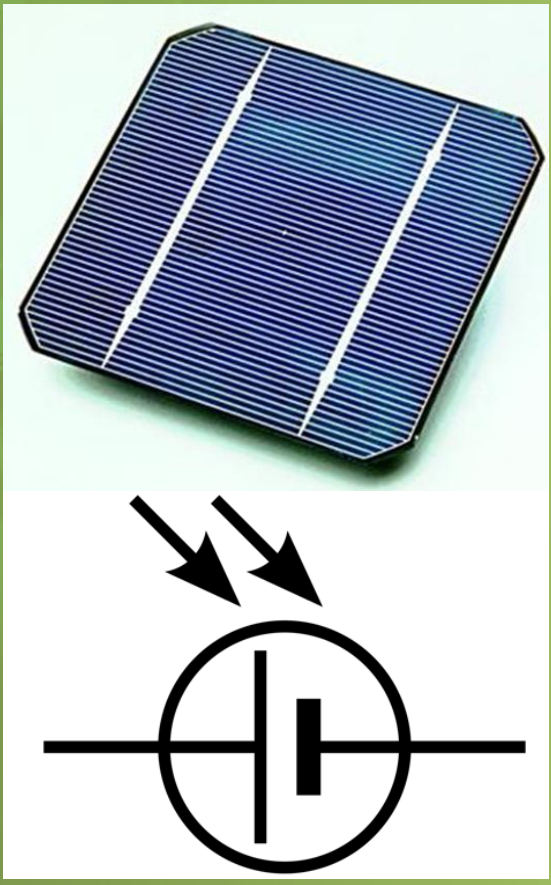
Fotodioda jest elementem, w którym złącze p-n wystawiane jest na działanie światła. Zazwyczaj pracuje spolaryzowana w kierunku zaporowym. Pod wpływem działania fotonów o odpowiednio wysokiej energii następuje przeniesienie elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, czego skutkiem jest generacja pary elektron-dziura. Prowadzi to do wzrostu prądu wstecznego diody. Fotodiody stosowane są w czujnikach optycznych, detektorach promieniowania oraz w komunikacji światłowodowej.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Fotoogniwo swoją zasadą działania odpowiada niespolaryzowanej fotodiodzie. Fotony padające na półprzewodnik generują pary elektron-dziura. Ładunek przestrzenny złącza powoduje przemieszczanie się mniejszościowych elektronów z półprzewodnika typu p do półprzewodnika typu n oraz mniejszościowych dziur z półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p. Powstaje różnica potencjałów pomiędzy obszarem typu p oraz n, nazywana siłą fotoelektryczną (napięciem fotoelektrycznym).



CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

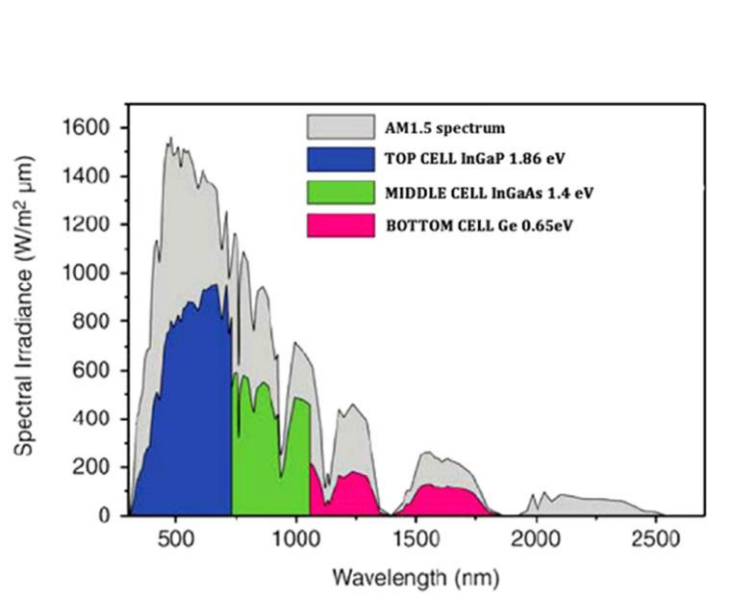
Aby możliwe było powstanie prądu fotoelektrycznego, padające na fotoogniwo fotony muszą posiadać energię wyższą od szerokości pasma wzbronionego półprzewodnika. Promieniowanie słoneczne składa się z fotonów o szerokim zakresie energii. Im krótsza długość fali promieniowania, tym większa energia fotonu.

Obecnie do produkcji energii elektrycznej najczęściej stosowane są panele fotowoltaiczne z ogniwami wytworzonymi z krzemu monokrystalicznego, o sprawności na poziomie od 19% do 24%. Praktycznie wyparły one obecnie rzadko stosowane ogniwa z krzemu polikrystalicznego, których sprawność wynosi od 16% do 20%.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Najwyższą sprawnością, sięgającą 47,6%, charakteryzują się fotoogniwa wielozłączowe. Wykonuje się je z warstw półprzewodników o różnej szerokości pasma wzbronionego. W każdej warstwie występuje złącze p-n. Pierwsza warstwa, o najwyższej szerokości pasma wzbronionego, pochłania fotony o najwyższej energii, przepuszczając fotony o niższej energii. W kolejnych warstwach, o coraz niższej szerokości pasma wzbronionego, proces się powtarza. Skutkiem jest efektywniejsze wykorzystanie widma słonecznego.



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Dioda elektroluminescencyjna (dioda LED, ang. Light Emitting Diode) to element półprzewodnikowy, który emituje światło pod wpływem przepływu prądu elektrycznego. W diodzie LED spolaryzowanej w kierunku przewodzenia elektrony z obszaru n przemieszczają się w kierunku obszaru p, a dziury z obszaru p przemieszczają się w kierunku obszaru n. W obszarze złącza dochodzi do rekombinacji elektronów z dziurami. Rekombinujący elektron przechodzi z pasma przewodzenia o wyższej energii do pasma

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

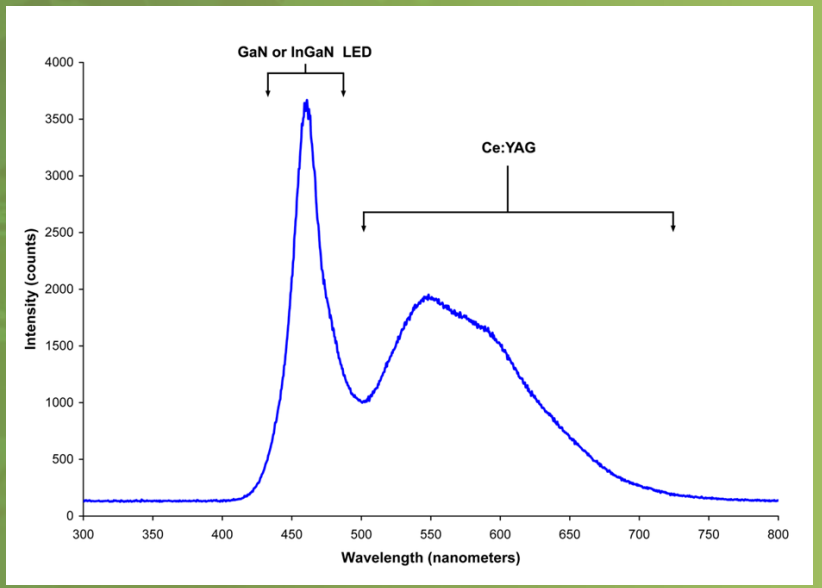
walencyjnego o niższej energii. Skutkiem tego jest emisja kwantu promieniowania o energii zbliżonej do szerokości pasma wzbronionego. Do produkcji diod LED stosuje się:

Kolor	Materiał	Przerwa energetyczna, eV	Długość fali, nm
podczerwień	arsenek galu (GaAs)	1,42	~870
czerwony	fosforek glinu, galu i indu (AlGaIn)	1,9–2,0	~620–650
zielony	fosforek galu (GaP)	2,29	~550
niebieski	azotek indu i galu (InGaN)	2,7-3,3	~460–380
ultrafiolet	azotek glinu (AlN)	6,0- 6,2	~200

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

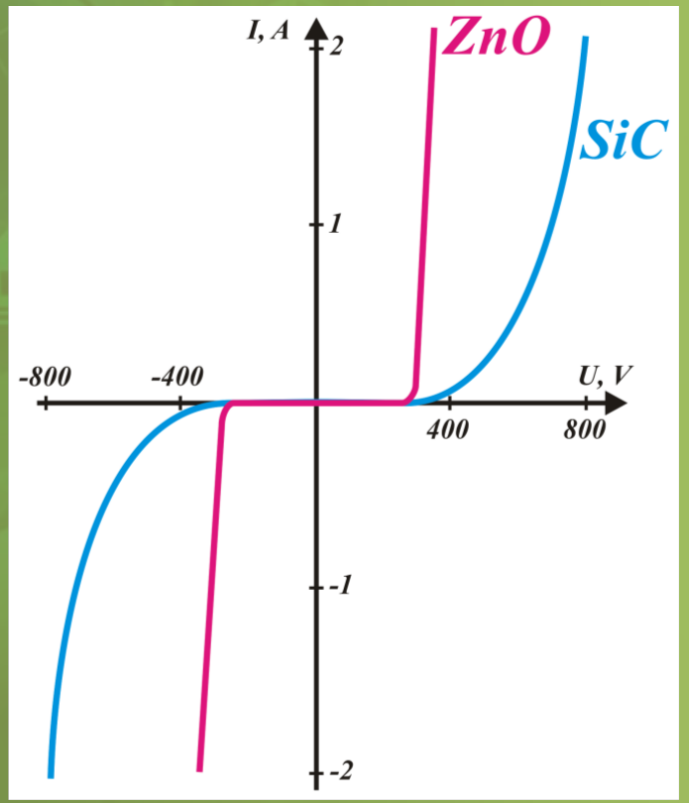
Najczęściej stosowaną metodą wytwarzania białych diod LED jest pokrywanie diod świecących w zakresie niebieskiego lub fioletowego światła luminoforami. Luminofor to materiał, który po pochłonięciu światła, np. niebieskiego, reemituje światło o niższej energii, np. w kolorze żółtym lub czerwonym. Ostatecznie mieszanina oryginalnego koloru niebieskiego i kolorów reemitowanych przez luminofor daje światło o barwie białej.



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Warystory są elementami półprzewodnikowymi, których rezystancja zależy silnie od wartości przyłożonego napięcia elektrycznego. Poniżej napięcia progowego warystory charakteryzują się wysoką rezystancją. Po przekroczeniu napięcia progowego rezystancja warystora gwałtownie maleje. Warystory są głównie wykorzystywane jako zabezpieczenia przeciwprzepięciowe. Najczęściej stosowanym materiałem do produkcji warystorów jest tlenek cynku (ZnO) i węglik krzemu (SiC).



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Krzem (Si) jest drugim pod względem występowania pierwiastkiem w skorupie ziemskiej, stanowiąc około 27% jej masy. Jest pierwiastkiem częściowo metalicznym o liczbie atomowej 14 i temperaturze topnienia 1420°C.Obecnie krzem stanowi podstawowy materiał, z którego wykonuje się około 90% półprzewodników. Do zastosowań w produkcji elektroniki wykorzystuje się krzem monokrystaliczny i polikrystaliczny o wysokiej czystości. Monokrystaliczny krzem jest wykorzystywany w zaawansowanych

CC BY

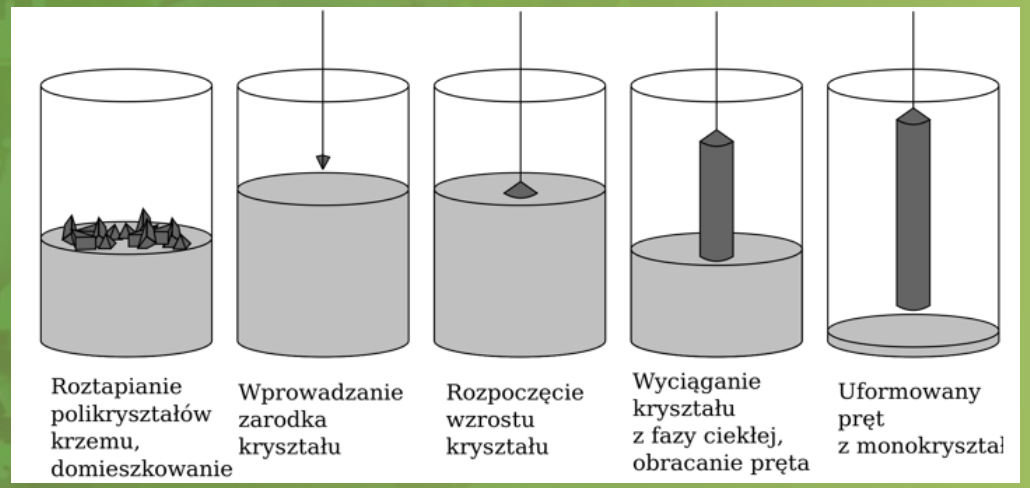
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

układach scalonych i tranzystorach, natomiast tańszy w otrzymywaniu krzem polikrystaliczny znajduje zastosowanie m.in. w produkcji paneli fotowoltaicznych o niższej sprawności. Wymagania stawiane materiałom do wytwarzania elementów elektronicznych w kontekście krzemu: Mała szerokość pasma wzbronionego. Łatwość wprowadzania domieszek. Rezystywność po domieszkowaniu w zakresie 10^{-5}–10^{1} Ω·m. Energia wzbudzenia atomów domieszek w zakresie 0.01–0.05 eV. Duża ruchliwość i długi czas życia nośników ładunku. Możliwość uzyskania odpowiedniej czystości. Niski koszt uzyskania struktury monokrystalicznej. Trwałość chemiczna i dobre właściwości mechaniczne.

CC BY

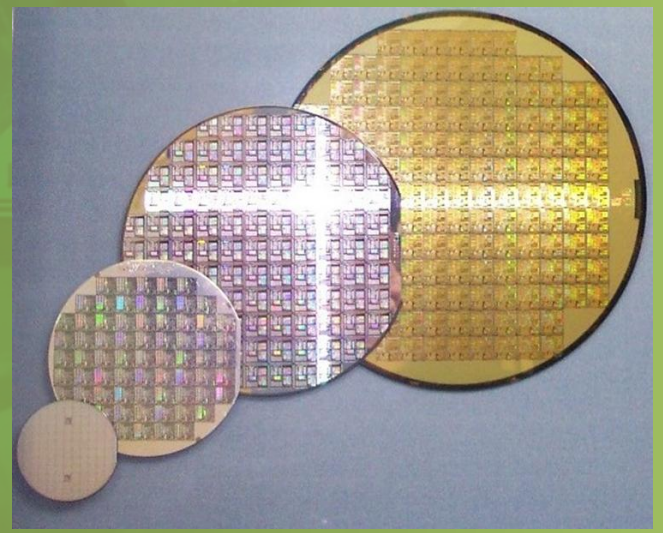
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Do produkcji wielu półprzewodników konieczne jest uzyskiwanie monokryształów. Najstarszą i najczęściej stosowaną metodą jest technika opracowana przez Jana Czochralskiego w 1916 roku. W tej metodzie polikrystaliczny półprzewodnik jest podgrzewany do temperatury topnienia. Następnie monokrystaliczny zarodek styka się z powierzchnią ciekłego półprzewodnika. Ze



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

względu na różnicę temperatur między monokryształem a ciekłym półprzewodnikiem następuje krystalizacja na powierzchni zarodka. Pręt z zarodkiem jest powoli wyciągany z prędkością odpowiadającą procesowi krystalizacji, przy jednoczesnym obracaniu, którego celem jest wyeliminowanie różnic temperatury na obwodzie powstającego kryształu. Powstały kryształ cięty jest na płytki nazywane waflami (ang. wafer), z których, wykonywane są elementy elektroniczne oraz układy scalone.



Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

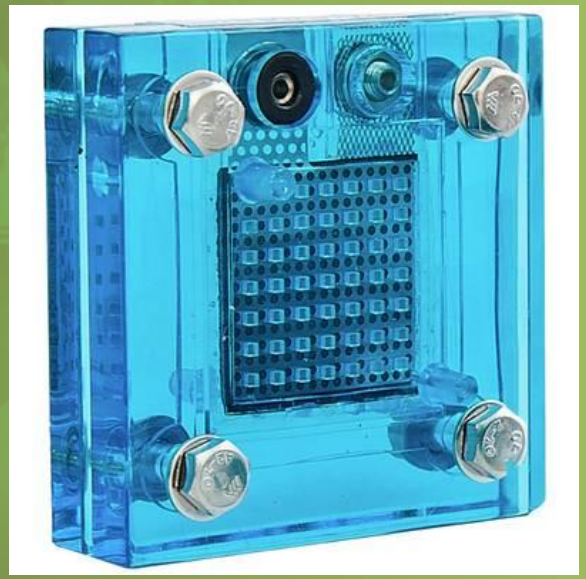
Ogniwa paliwowe. Zjawiska termoelektryczne.

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Ogniwo paliwowe jest urządzeniem elektrochemicznym, w którym następuje łączenie paliwa (np. wodór, metan) z utleniaczem (zazwyczaj tlen z powietrza), którego skutkiem jest zamiana energii chemicznej na elektryczną. W ogniwach paliwowych nie zachodzi proces spalania paliwa, przez co są efektywnym i ekologicznym źródłem energii elektrycznej. Dzięki szerokiemu zakresowi zastosowań, ogniwa paliwowe wykorzystywane są między innymi w pojazdach elektrycznych i systemach zasilania awaryjnego.

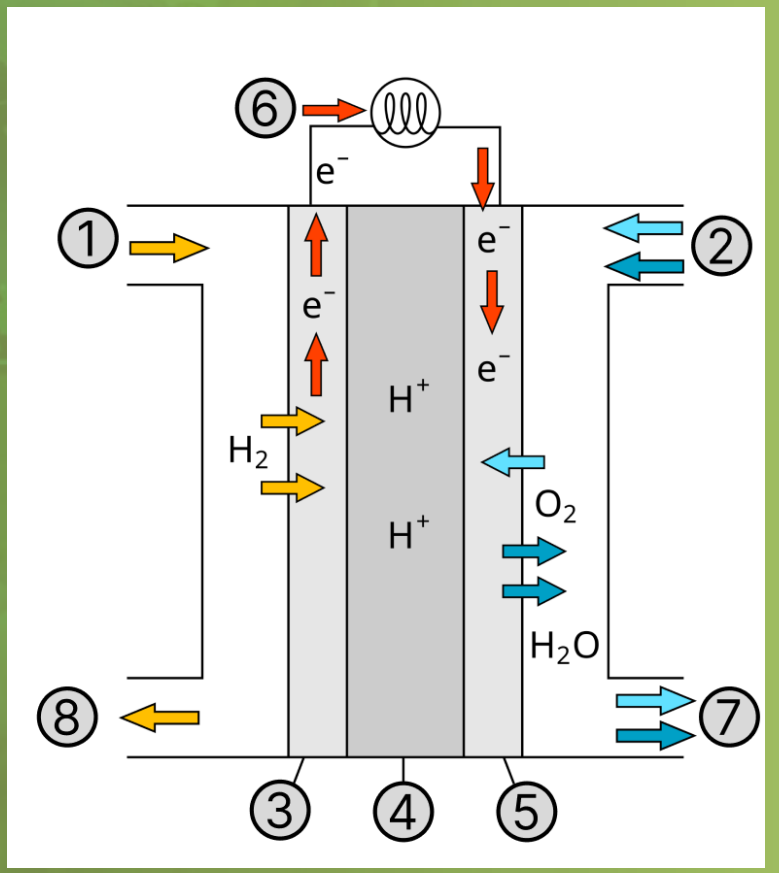


CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Budowa ogniwa paliwowego z membraną wymiany protonów (PEMFC):

1 – paliwo, 2 – powietrze, 3 – anoda, 4 – elektrolit, 5 – katoda, 6 – obciążenie ogniwa, 7 – nadmiar powietrza i woda, 8 – nadmiar paliwa

Zasada działania ogniwa paliwowego PEMGC: Docierający do anody wodór, pod wpływem działania katalizatora (np. platyna), ulega rozszczepieniu na protony H^+ i elektrony e^-:



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$$

Dodatnie protony przechodzą przez membranę wymiany protonów do katody. Elektrony nie mogąc przejść przez membranę przepływają z anody do katody poprzez łączące je obciążenie. Docierające poprzez membranę protony wodoru łączą się z tlenem i elektronami, które przepłynęły przez obwód z obciążeniem, czego skutkiem jest powstanie wody:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$

Ostatecznie możemy zapisać sumaryczne równanie pracy ogniwa:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + ciepło + energia\ elektryczna$$

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Typy ogniw paliwowych:

Ogniwa paliwowe z membraną wymiany protonów (ang. Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC) nazywane również ogniwami paliwowymi z elektrolitem polimerowym (ang. Ploymer Electrolyte Fuel Cells, PEFC), często skrótowo nazywanymi PEM. Charakteryzuje je wysoka gęstość prądu, niska temperatura pracy, szybki czas rozruchu, cicha praca i ekologiczność (produktem ubocznym jest woda). Sprawność tego typu ogniw paliwowych sięga 65%.

Alkaiczne ogniwa paliwowe (ang. Alkaline Fuel Cells – AFC) charakteryzują

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

się wysoką sprawnością przekraczającą 65% temperaturą pracy w zakresie od 100 °C do 250 °C. Jako elektrolit najczęściej stosuje się w nich wodne roztwory wodorotlenku potasu (KOH). Wykorzystywane były w statkach programu Apollo prowadzonego przez NASA.

Ogniwa paliwowe z elektrolitem z kwasu fosoforowego (ang. Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) charakteryzują się pracą w temperaturach od 150 °C do 220 °C, w niższych temperaturach elektrolit ogniwa PAFC jest słabym przewodnikiem protonów. Osiągają niższe sprawności (ok. 40%) ale charakteryzują się długą żywotnością.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Ogniwa paliwowe z zestalonym elektrolitem tlenkowym (ang. Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) w ogniwach tych zamiast ciekłego elektrolitu stosuje się warstwę ceramiczną, najczęściej na bazie tlenku cyrkonu (ZrO_2) stabilizowanego tlenkiem itru (Y_2O_3) Pracują one przy wysokich temperaturach od 600 °C do 1000 °C. Ich sprawność osiąga 60 %.

Ogniwa paliwowe z elektrolitem ze stopionych węglanów (ang. Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) charakteryzuje się wysoką temperaturą pracy ok. 650 °C. Dzięki zastosowaniu wysokiej temperatury można stosować w nich tańsze katalizatory. Elektrolitem w tego typu ogniwach są stopione w wysokich temperaturach węglany litu oraz sodu lub potasu. Osiągają

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

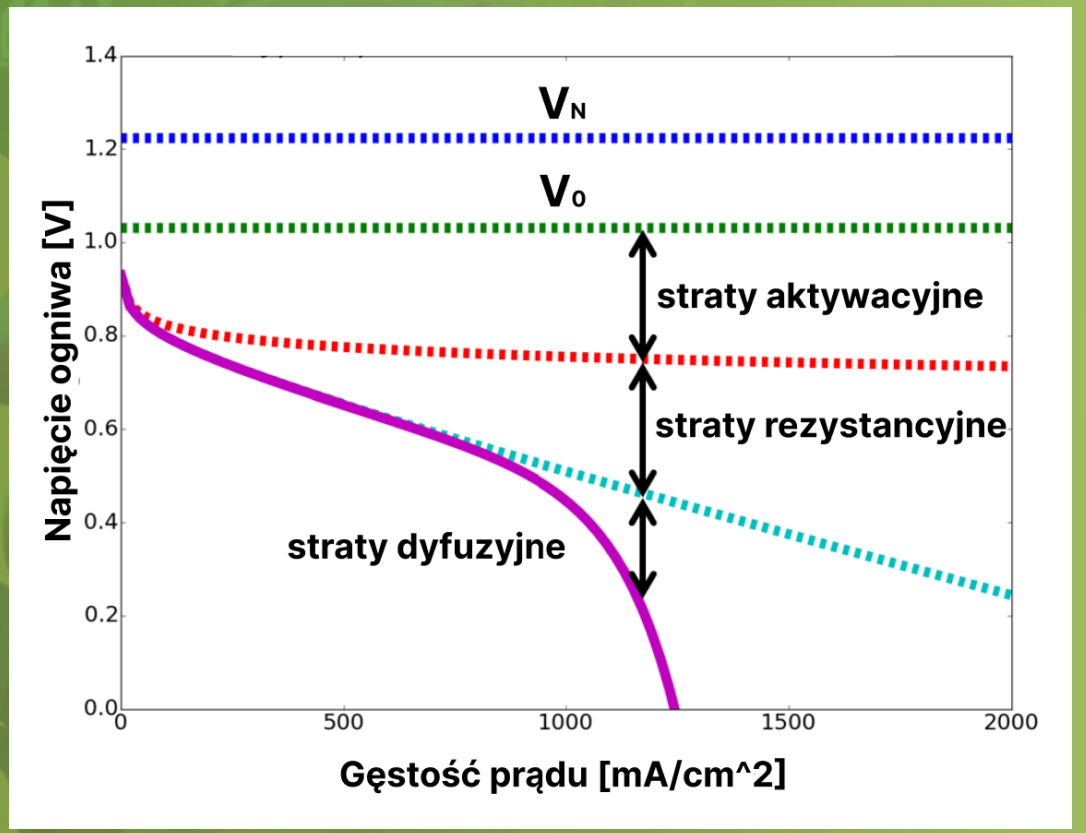
sprawność rzędu 60 %. Jako paliwo może być zastosowany wodór, tlenku węgla, gaz ziemny, propan oraz produktów zgazowywania węgla.

Ogniwa paliwowe bezpośrednio zasilane metanolem (ang. Direct Methanol Fuel Cells, DMFC), charakteryzują się wykorzystaniem jako paliwa metanolu, który przy ciśnieniu atmosferycznym jest cieczą. Ogniwa te wykorzystują taki sam rodzaj elektrolitu jak ogniwa PEM. W okolicy anody przeprowadzany jest reforming parowy (proces produkcji wodoru z metanu i pary wodnej w obecności katalizatora metalicznego). Efektem ubocznym pracy tego typu ogniwa jest wydzielanie dwutlenku węgla.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Po dostarczeniu do ogniwa PEM wodoru i tlenu na jego zaciskach pojawia się napięcie. Teoretycznie ogniwo w stanie jałowym (nieobciążone) powinno wytwarzać na zaciskach różnicę potencjałów o wartości V_N = 1.229V (dla T=25°C), wynikającą z elektrochemicznego potencjału Nerst'a. Ze względu na przedostawanie się przez membranę



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

małych ilości tlenu i wodoru napięcie jałowe ogniwa V_0 jest niższe od teoretycznego V_N. W zakresie niskich gęstości prądu początkowo napięcie ogniwa gwałtownie spada wraz ze wzrostem natężenia prądu. Przyczyną są straty aktywacyjne, wynikające z energii potrzebnej do rozpoczęcia reakcji elektrochemicznych na elektrodach tj. utleniania wodoru na anodzie i redukcji tlenu na katodzie. W zakresie średnich gęstości prądu występuje praktycznie liniowy spadek napięcia w funkcji wzrostu natężenia płynącego prądu. Spowodowany jest on stratami rezystancyjnymi, wynikającymi z rezystancji membrany, która ma określoną przewodność protonową, a jej opór wzrasta wraz ze zmniejszeniem jej uwodnienia. Dodatkowo wpływ

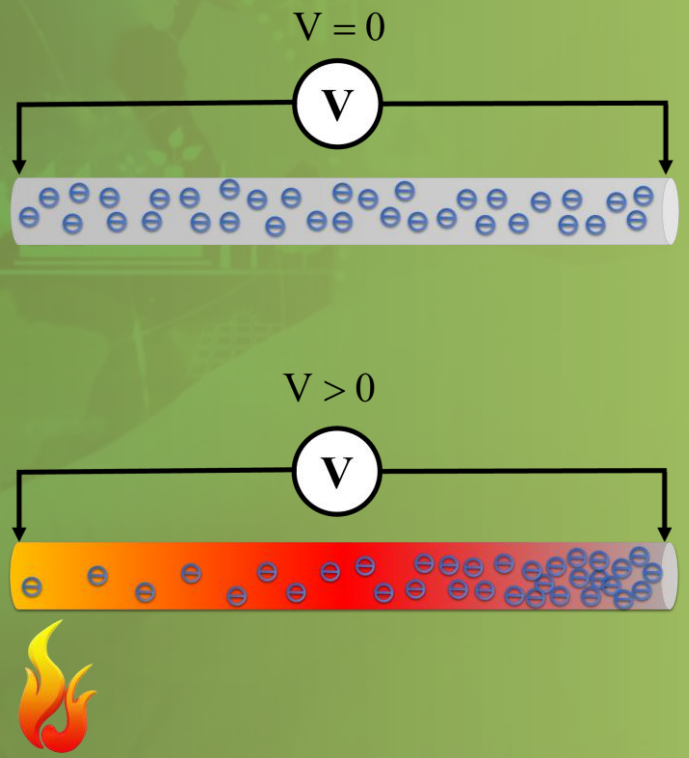
CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

na ten typ strat ma rezystancja pomiędzy poszczególnymi elementami ogniwa. W zakresie wysokich gęstości prądów wraz ze wzrostem natężenia płynącego prądu napięcie spada gwałtownie. Przy dużych gęstościach prądu wodór i tlen nie mogą wystarczająco szybko docierać do miejsc, w których dochodzi do reakcji elektrochemicznych. Przy dużych szybkościach reakcji może następować spadek stężenia reagentów, który ogranicza wydajność reakcji. Ten typ strat nazywany jest stratami dyfuzji (straty masowe).

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Zjawisko Seebecka polega na powstawaniu napięcia elektrycznego w przewodniku (metalu lub półprzewodniku) pod wpływem różnicy temperatur. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie energia nośników ładunku, co skutkuje ich przepływem w kierunku obszaru o niższej temperaturze. Konsekwencją tego przepływu jest zwiększenie koncentracji nośników w chłodniejszym obszarze i jednoczesny spadek ich koncentracji w cieplejszym. Powstała w ten sposób



CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

różnica koncentracji nośników ładunku prowadzi do pojawienia się siły termoelektrycznej, czyli napięcia elektrycznego pomiędzy obszarami o różnych temperaturach. Miarą zdolności materiału do generowania napięcia w wyniku różnicy temperatur jest współczynnik Seebecka:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta T}, \left[\frac{V}{K}\right]$$

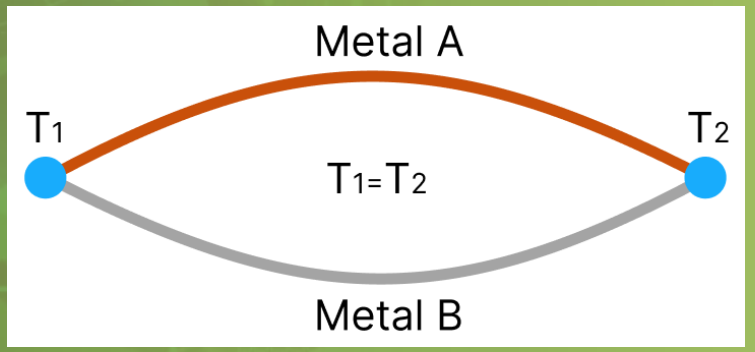
Gdzie: ΔU – napięcie termoelektryczne generowane przez materiał, ΔT – różnica temperatur pomiędzy gorącym a zimnym końcem materiału.

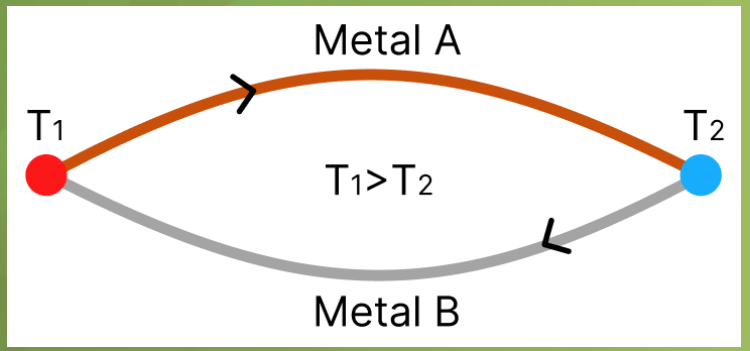
Jeśli elektrycznie połączymy dwa metale o różnych poziomach Fermiego,

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

nastąpi dyfuzja elektronów z metalu o wyższym poziomie Fermiego do metalu o niższym poziomie Fermiego. W efekcie powstaje kontaktowa różnica potencjałów. Jeżeli z tych dwóch metali utworzymy zamknięty obwód, powstaną dwa złącza. Gdy oba złącza mają tę samą temperaturę, potencjały kontaktowe są równe. Natomiast jeśli temperatura złączy jest różna, pojawia się różnica potencjałów, co prowadzi do przepływu prądu w obwodzie. Wartość napięcia w obwodzie





CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

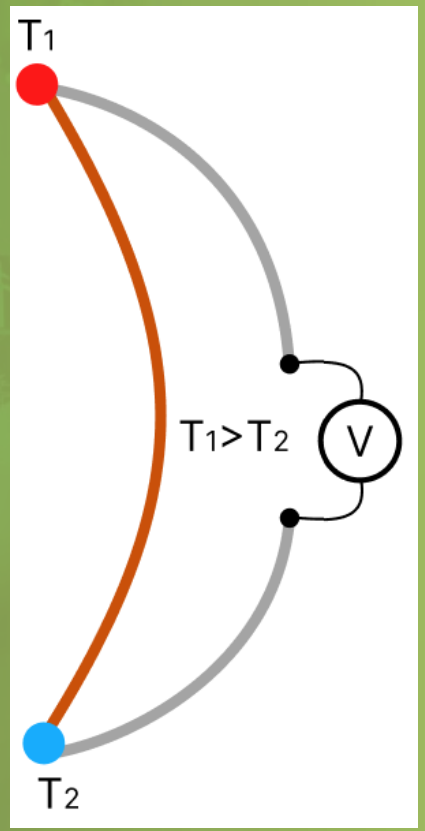
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

otwartym, zbudowanym z dwóch złączy metali, zależy od różnicy współczynników Seebecka tych metali oraz różnicy temperatur złączy:

$$\Delta V = (S_A - S_B)(T_1 - T_2), [V]$$

Gdzie: S_A , S_B - współczynniki Seebecka metali tworzących złącza, T_1, T_2 - temperatury złącz.

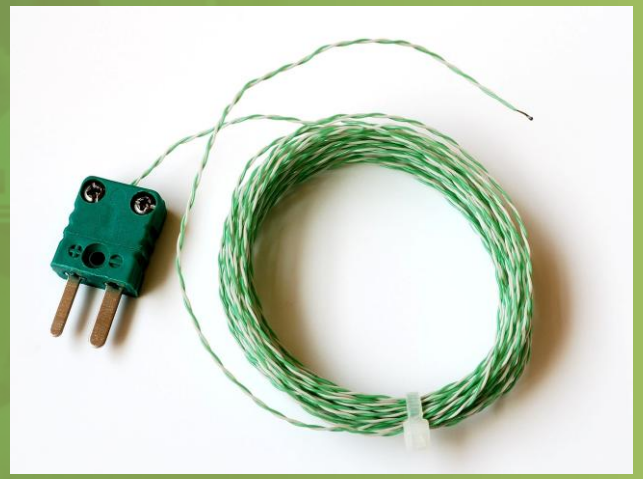
Zjawisko Seebecka znalazło praktyczne zastosowanie między innymi w termoparach, które wykorzystuje się jako czujniki temperatury. Zakładając, że w danym zakresie temperatur współczynniki Seebecka dwóch



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

przewodników nie zmieniają się, napięcie termoelektryczne mierzone w otwartym obwodzie z dwoma złączami przewodników jest wprost proporcjonalne do różnicy temperatur między złączem o wyższej temperaturze (tzw. gorącym) a złączem o niższej temperaturze (tzw. zimnym). Znając temperaturę złącza zimnego, różnicę współczynników Seebecka oraz wartość napięcia termoelektrycznego, można wyznaczyć temperaturę złącza gorącego.



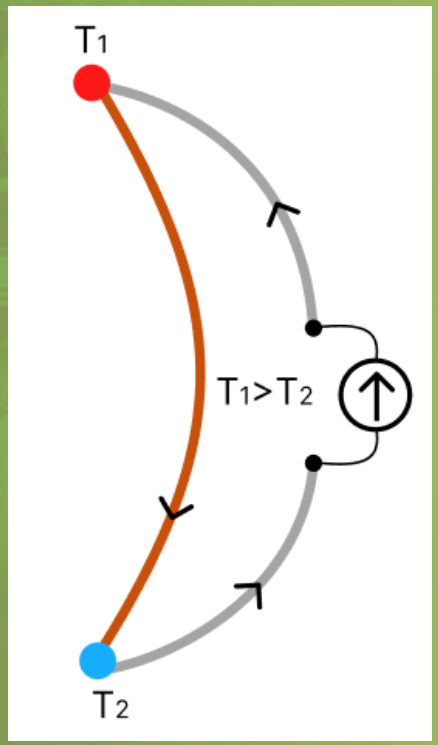
Termopara typu K

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską
NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zjawiskiem odwrotnym do zjawiska Seebecka jest **zjawisko Peltiera**. Gdy połączymy ze sobą dwa przewodniki o różnych poziomach Fermiego (tworząc dwa złącza) i wymusimy przepływ prądu elektrycznego, temperatura jednego złącza wzrośnie, a drugiego spadnie. Dzieje się tak, ponieważ elektrony przekraczające granicę złącza od metalu o wyższej energii Fermiego do metalu o niższej energii Fermiego oddają część energii w postaci ciepła, „dopasowując się" do nowego poziomu energetycznego. Powoduje to



CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

wzrost temperatury w tym złączu. Z kolei w drugim złączu elektrony przechodzą od metalu o niższej energii Fermiego do metalu o wyższej energii Fermiego. Aby tego dokonać, muszą pobrać energię w celu „dostosowania się" do wyższego poziomu energetycznego. Pobierając ją z otaczającej sieci krystalicznej, obniżają temperaturę tego złącza.

Wielkością charakteryzującą zjawisko Peltiera jest współczynnik Peltiera Π wyrażany w [J/C] (równoważnie [V]). Ilość ciepła pochłanianego lub wydzielanego w jednostce czasu (Q) w złączu dwóch materiałów w związku ze zjawiskiem Peltiera opisuje następujący wzór:

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

$$Q = (\Pi_A - \Pi_B)I, \left[\frac{J}{s}\right]$$

Gdzie: Π_A, Π_B współczynniki Peltiera materiałów, z których wykonane jest złącze, *I* – natężenie prądu płynące przez złącze.

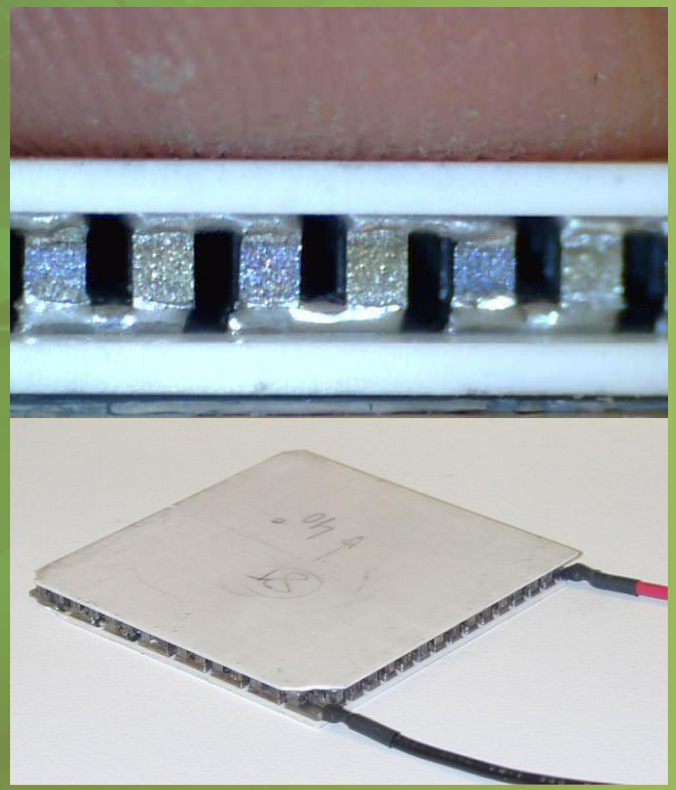
Współczynnik Peltiera jest ściśle powiązany ze współczynnikiem Seebeck'a:

$$\Pi = ST$$

Gdzie: T – temperatura bezwzględna

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Zjawisko Peltiera znajduje główne zastosowanie w termoelektrycznych układach chłodzących, tzw. ogniwach Peltiera. W urządzeniach tych stosuje się szeregowe połączenie wielu par materiałów (zwykle półprzewodników) o różnych współczynnikach Peltiera. Pod wpływem przepływu prądu elektrycznego po jednej stronie ogniwa temperatura rośnie, podczas gdy po przeciwnej stronie ulega obniżeniu.



Do zalet ogniw Peltiera należą; niewielkie rozmiary,

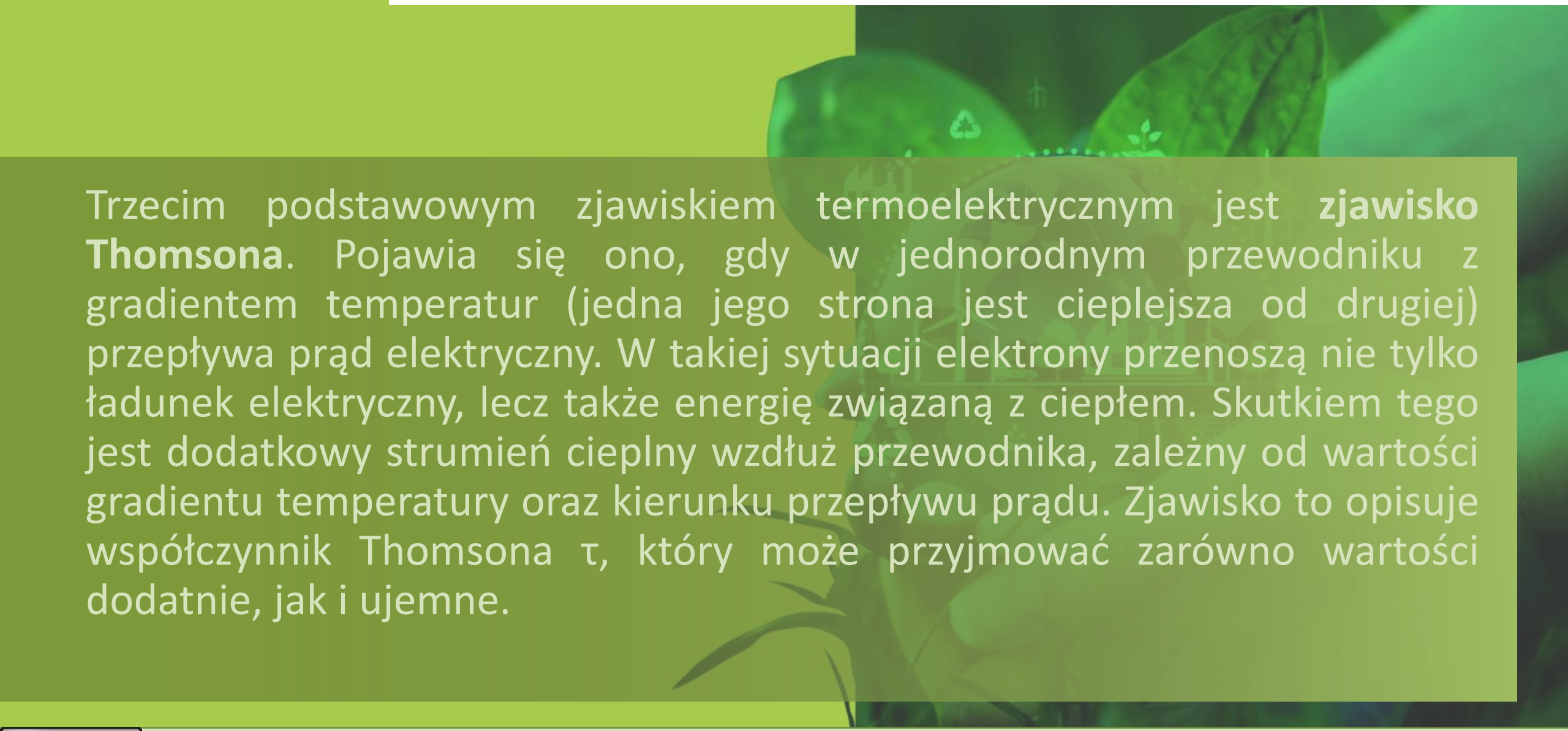
CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację" realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

brak części ruchomych i możliwość precyzyjnej kontroli temperatury. Istotną właściwością jest fakt, że zmiana polaryzacji napięcia zasilającego powoduje odwrócenie kierunku pracy ogniwa: strona „gorąca” staje się „zimną” i odwrotnie. Dzięki temu z trybu chłodzenia łatwo jest przejść w tryb grzania.

Główną wadą ogniwa Peltiera jest niska sprawność chłodnicza wynikająca w dużej mierze z nagrzewania się ogniwa podczas przepływu prądu (straty rezystancyjne Joule’a). Dodatkowo do skutecznej pracy strony zimnej ogniwa konieczne jest aktywne chłodzenie strony gorącej ogniwa.

CC BY

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Trzecim podstawowym zjawiskiem termoelektrycznym jest **zjawisko Thomsona**. Pojawia się ono, gdy w jednorodnym przewodniku z gradientem temperatur (jedna jego strona jest cieplejsza od drugiej) przepływa prąd elektryczny. W takiej sytuacji elektrony przenoszą nie tylko ładunek elektryczny, lecz także energię związaną z ciepłem. Skutkiem tego jest dodatkowy strumień cieplny wzdłuż przewodnika, zależny od wartości gradientu temperatury oraz kierunku przepływu prądu. Zjawisko to opisuje współczynnik Thomsona τ, który może przyjmować zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne.

CC BY
POLITECHNIKA LUBELSKA
Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego

Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską

NCBR Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

dr inż. Przemysław Rogalski
dr inż. Konrad Kierczyński

Dziękuję za uwagę

CC BY

POLITECHNIKA LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.