

Złącze metal(ferromagnetyk)/nadprzewodnik. Odbicia Andreeva

Marta Wleklińska

16 lipca 2025

1 Wstęp

Celem ćwiczenia było zbadanie układu: metal (NM: *normal metal*)/nadprzewodnik (SC: *superconductor*) oraz NM/SC/NM. Ponownie korzystając z pakietu kwant, mogliśmy po definicji układu w przystępny sposób zbadać relację dyspersji, konduktancję, różne współczynniki odbić, etc.

2 Wyniki

2.1 NM/SC

Ćwiczenie rozpoczęliśmy od układu NM/SC. Dyskretyzacja równania

$$\begin{bmatrix} -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(x) - \mu - h(x) & \Delta(x) \\ \Delta(x) & -\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(x) - \mu + h(x)\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_e^\uparrow(x) \\ \psi_h^\downarrow(x) \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \psi_e^\uparrow(x) \\ \psi_h^\downarrow(x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

prowadzi do wyrażenia na onsite oraz hopping kolejno

$$\begin{bmatrix} 2t + V(x) - h(x) - \mu & \Delta(x) \\ \Delta(x) & -2t - V(x) - h(x) + \mu \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} -t & 0 \\ 0 & t \end{bmatrix}, \quad (3)$$

gdzie $t = \hbar^2 / (2m * dx^2)$. Funkcje $h(x)$ oraz $\Delta(x)$ przyjmowały różne wartości w zależności od tego, czy x było w obszarze NM czy SC, tj.

$$h(x) = \begin{cases} P\mu, & \text{dla obszaru NM,} \\ 0.0, & \text{dla obszaru SC,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta(x) = \begin{cases} 0.0 & \text{dla obszaru NM,} \\ \Delta & \text{dla obszaru SC.} \end{cases} \quad (5)$$

Dodatkowo, wprowadzony został potencjał rozpraszania $V(x)$ zlokalizowany na styku NM/SC w postaci

$$V(x) = Z\mu \exp\left[-\frac{(x - x_{\text{center}})^2}{2a^2}\right], \quad (6)$$

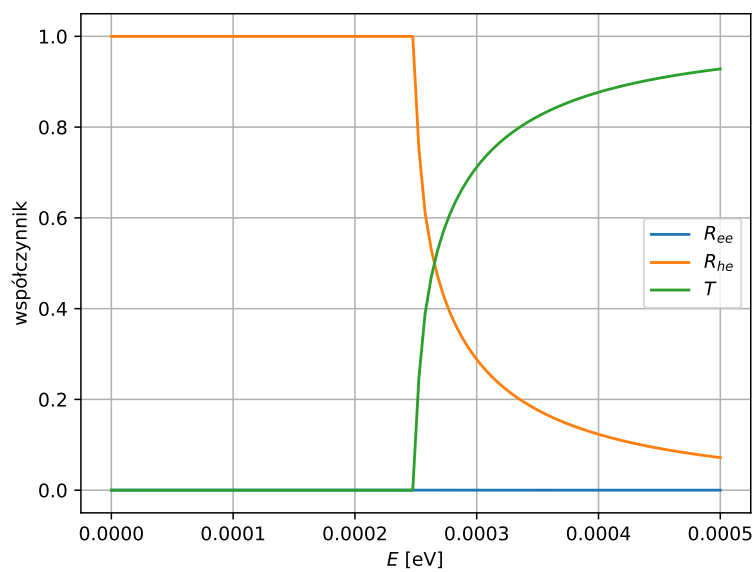
przy czym x_{center} określa położenia styku FM/SC.

W pierwszej części ćwiczenia, przyjęliśmy wartości $P = 0.0, Z = 0.0$. Na rysunku 1 przedstawione zostały wyniki transmisji, współczynnika odbicia E_{ee} oraz Andreeva R_{he} .

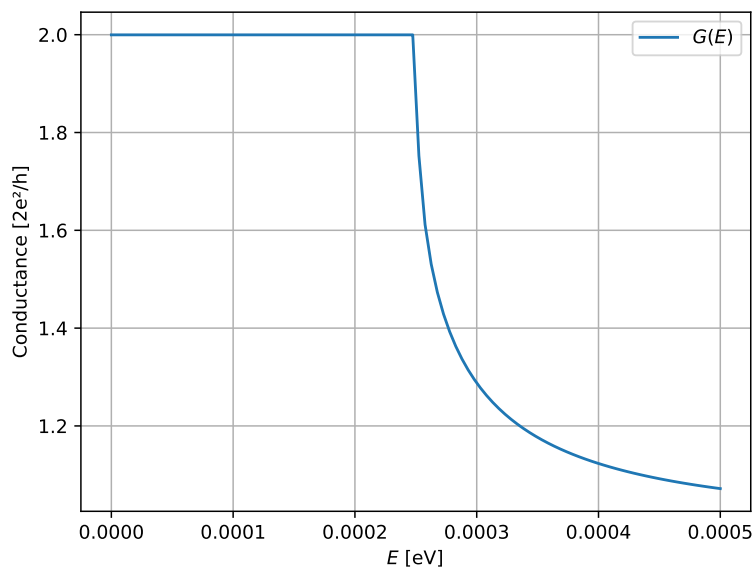
Następnie za pomocą zależności

$$G(E) = \frac{e^2}{h} (1 - R_{ee}(E) + R_{he}(E)) \quad (7)$$

można było wyznaczyć zależność konduktancji w funkcji energii, co zostało przedstawione na rysunku 2 Mo-



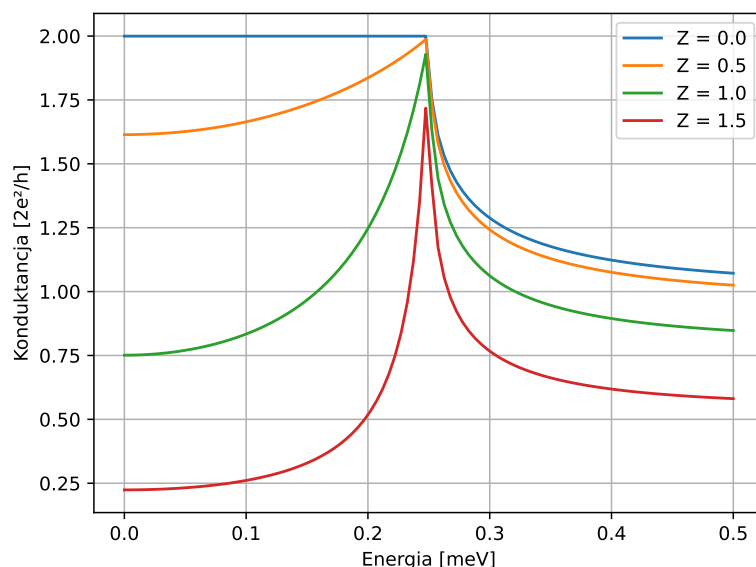
Rysunek 1: Współczynniki transmisji w funkcji energii padającego elektronu dla złącza NM/SC.



Rysunek 2: Konduktancja w funkcji energii padającego elektronu dla złącza NM/SC

żemy zauważyć, że podwojenie konduktancji następuje dla pewnych niższych wartości energii - później maleje ona do jedności.

W kolejnych częściach badaliśmy wpływ parametrów Z, P , które mówiły o pewnych niedoskonałościach układu. Przy niezerowym Z (amplituda potencjału rozpraszania) zbadaliśmy ponownie konduktancję. Wyniki dla wybranych Z zostały przedstawione na rysunku 3. Ponownie obserwujemy podwojenie konduktancji (lub prawie podwojenie) dla wszystkich

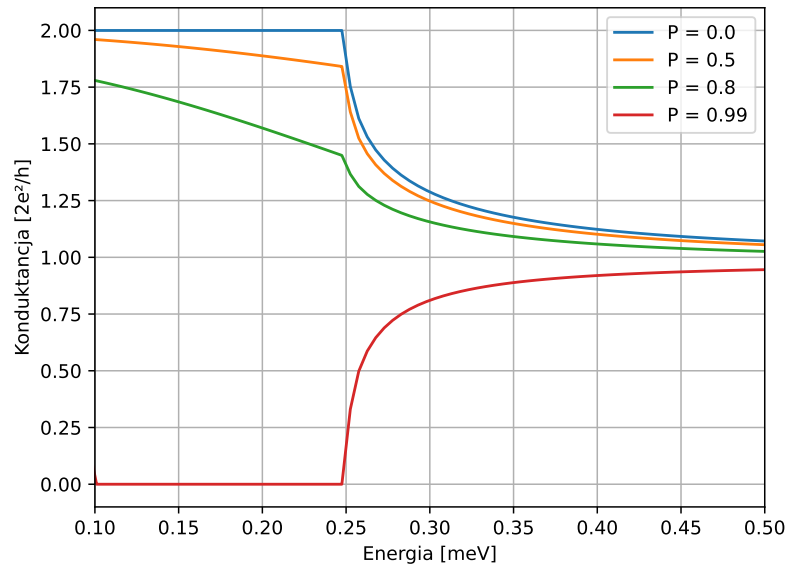


Rysunek 3: Konduktancja w funkcji energii padającego elektronu dla złącza NM/SC przy założeniu różnej siły rozpraszania na złączu.

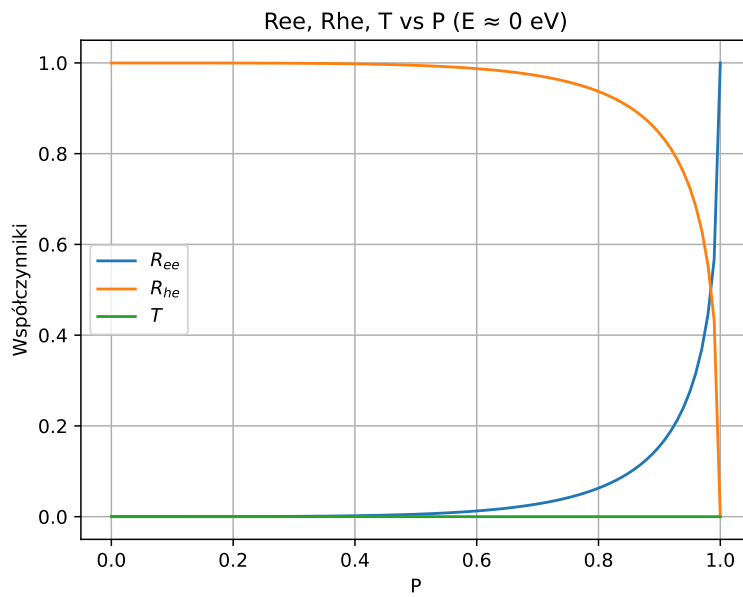
rozpatrywanych przypadków, jednak występuje ono dla konkretnej wartości energii ~ 25 meV, co jest również szerokością przerwy nadprzewodzącej.

Następnie przy zerowej wartości Z , przyjęliśmy niezerowe P i wyznaczyliśmy kolejne zależności konduktancji w funkcji energii, co zostało przedstawione na rysunku 4. Obserwujemy różnice względem przypadku idealnego $P = 0, Z = 0$, nie obserwując kompletnego podwojenia konduktancji.

Jako ostatnią zależność, zbadaliśmy ponownie współczynniki odbicia, transmisji w funkcji P , co zostało zapisane na rysunku 5. Odbicie Andreeva zanika dla dużych P , ponieważ dla spinowo spolaryzowanego FM brakuje odpowiedniego stanu dziury z przeciwnym spinem.



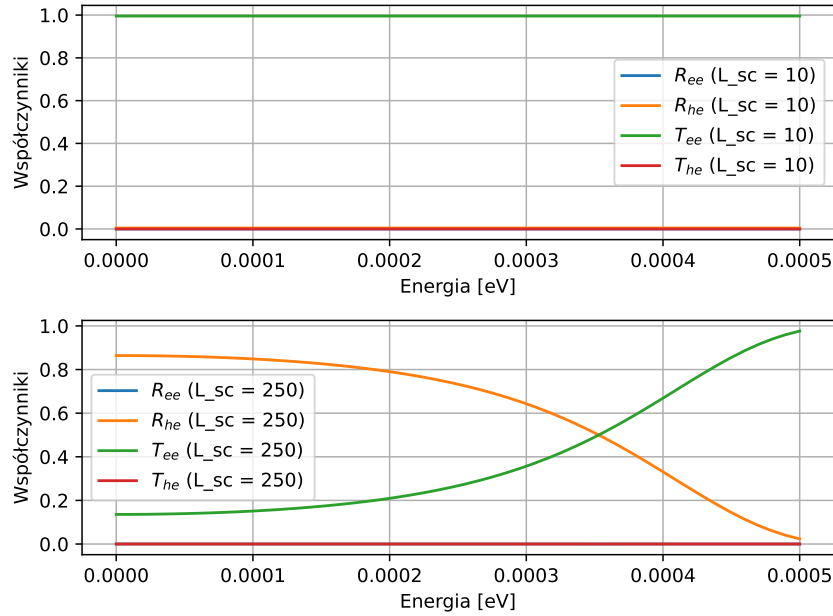
Rysunek 4: Konduktancja w funkcji energii padającego elektronu dla złącza FM/SC przy założeniu różnej spinowej polaryzacji ferromagnetyka, P



Rysunek 5: Współczynniki w funkcji polaryzacji obszaru ferromagnetyka policzona dla złącza FM/SC. Wyniki dla energii padającego elektronu E=1e-06

2.2 NM/SC/NM

W drugim ćwiczeniu analizowaliśmy układ NM/SC/NM. Dla każdego obszaru NM przyjęliśmy osobne parametry P_l, P_r . W pierwszym przypadku przyjęliśmy $P_l = P_r = 0.0$. Współczynniki transmisji i odbicia w funkcji energii padającego elektronu zostały zapisane na rysunku 6. Badaliśmy tutaj wpływ szerokości obszaru SC: $L_{sc} = 10, 250$ nm. Na górnym



Rysunek 6: Współczynniki transmisji w funkcji energii padającego elektronu dla złącza NM/SC/NM. Wyniki dla złącza, w którym długość obszaru SC (góra) $L_{SC} = 10$ nm oraz (dół) $L_{SC} = 250$ nm.

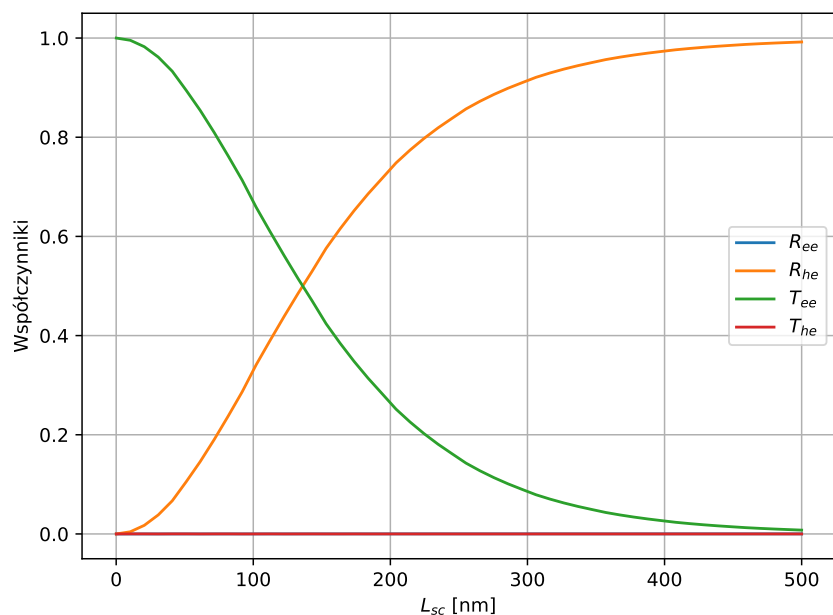
rysunku ($L_{sc} = 10$ nm) nie obserwujemy zmian żadnych ze współczynników w funkcji rozpatrywanych energii. Z kolei na dolnym rysunku ($L_{sc} = 250$ nm) wraz ze wzrostem energii, maleje wartość odbicia Andreeva i rośnie współczynnik transmisji elektron–elektron.

Zbadaliśmy następnie wpływ szerokości L_{sc} na powyższe współczynniki przy stałej energii poniżej przerwy nadprzewodzącej, np. $E = 0.1e - 03$. Dane zależności zostały zapisane na rysunku 7. Obserwujemy, że wraz ze wzrostem długości L_{SC} rośnie współczynnik odbicia Andreeva R_{he} , natomiast transmisja elektron–elektron T_{ee} maleje.

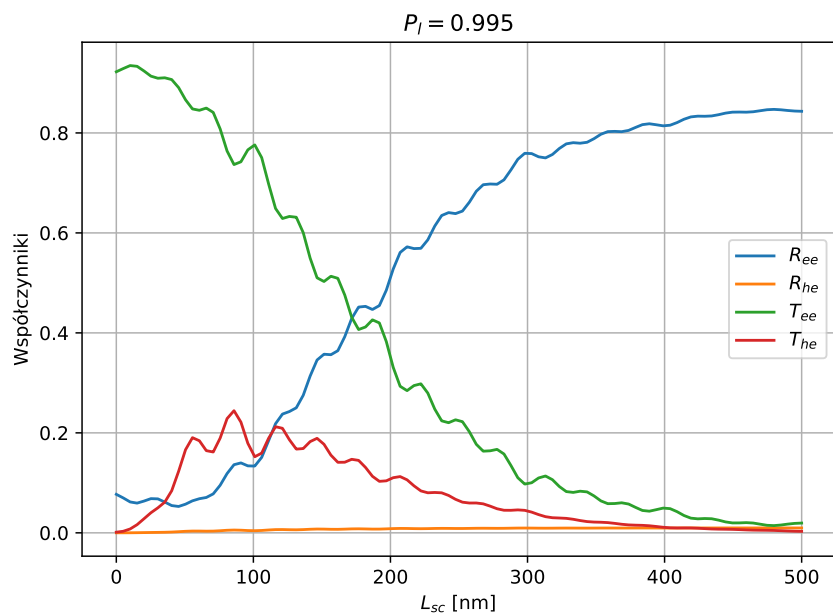
Na koniec przeanalizowano przypadek asymetrycznego kontaktu: $P_l = 0.995$, $P_r = 0$, przy tej samej energii $E = 0.1$ meV. Wyniki przedstawiono na rysunku 8. W tym przypadku współczynnik transmisji elektron–elektron T_{ee} ponownie maleje z długością SC, natomiast pojawia się również niezerowy składnik transmisji elektron–dziura T_{he} dla krótszych długości L_{SC} . Może to świadczyć o występowaniu skośnych odbić Andreeva.

3 Podsumowanie

W ramach ćwiczenia badano nanostruktury typu NM/SC oraz NM/SC/NM, koncentrując się na zjawisku odbicia Andreeva oraz wpływie parametrów takich jak długość obszaru nadprzewodzącego i spinowa polaryzacja kontaktów na współczynniki transmisji i odbicia.



Rysunek 7: Współczynniki transmisji w funkcji długości obszaru nadprzewodzącego LSC dla złącza NM/SC/NM. Wyniki dla energii padającego elektronu $E = 0.1$ meV



Rysunek 8: Współczynniki transmisji w funkcji długości obszaru nadprzewodzącego LSC dla złącza NM/SC/NM. Wyniki dla energii padającego elektronu $E = 0.1$ meV, $P_r = 0$, oraz $P_l = 0.995$