

# Wstęp do spintroniki - tranzystor spinowy.

Marta Wleklińska

16 lipca 2025

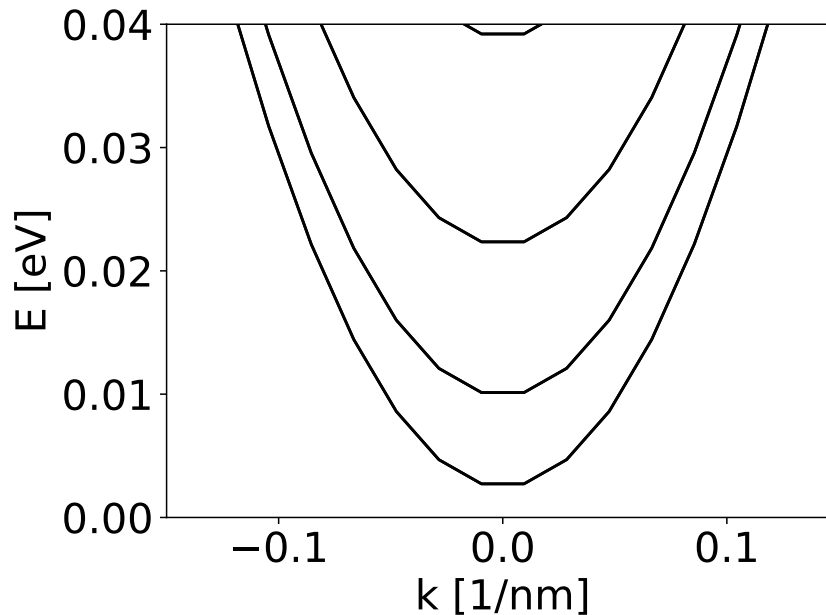
## 1 Wstęp

W ćwiczeniu analizowano nanourządzenia spintroniki. Ponownie korzystano z pakietu *Kwant*, którym po zdefiniowaniu układu, mogliśmy badać jego parametry: np. relacje dyspersji w obecnościach różnych pól magnetycznych, konduktancje, transmitancje.

## 2 Wyniki

### 2.1 Precesja spinu w zewnętrznym polu magnetycznym

W pierwszym ćwiczeniu badaliśmy precesję spinu w zewnętrznym polu magnetycznym. Rozpatrywany układ był nanodrukiem 2D o długości  $L$  i szerokości  $W$ . Na rysunku 1 została przedstawiona relacja dyspersji takiego układu. W kolejnym

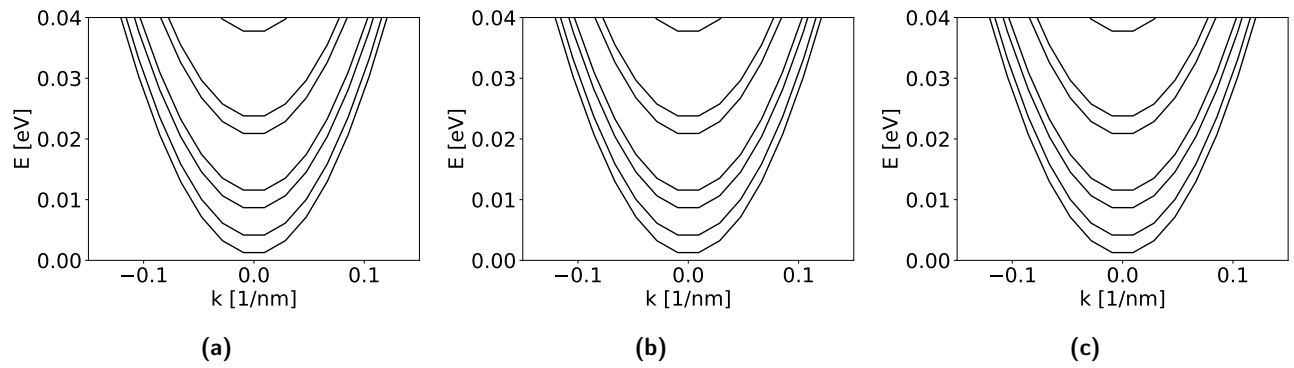


**Rysunek 1:** Relacja dyspersji  $E(k)$  dla  $B = 0$

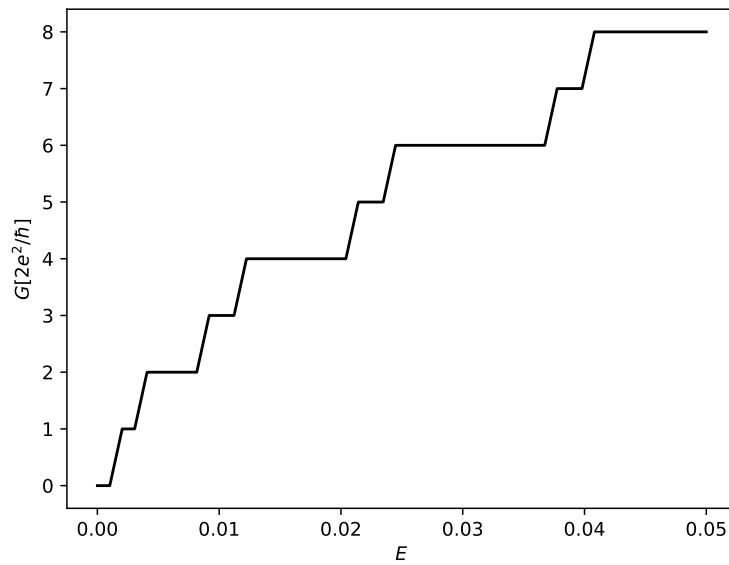
kroku wprowadziliśmy pole magnetyczne - skierowane dla kolejnych kierunków  $x, y, z$ . Na rysunku 2 zostały zapisane ponownie relacje dyspersji przy przyłożonym polu. W porównaniu do rysunku 1 obserwujemy dla każdego z rysunków 2a, 2b, 2c więcej modów. Obserwujemy rozszczepienie Zeemana, które nie zależy od kierunku przyłożenia pola (dla każdego  $x, y, z$ ) relacja dyspersji ma ten sam kształt.

Następnie ustaliliśmy pole  $\mathbf{B} = (0 \ 0 \ B_z)$  i wyznaczyliśmy zależność konduktancji w funkcji energii na rysunku 3. Przez pojawianie się kolejnych modów przez rozszczepienie Zeemana (rys. 2c) schodki konduktancji  $2e^2/h$ .

W kolejnej modyfikacji układu wprowadziliśmy pole  $\mathbf{B} = (0 \ B_y \ B_z)$ . Wartość  $B_z = 0.1 \text{ T}$  jest ustalona podczas gdy

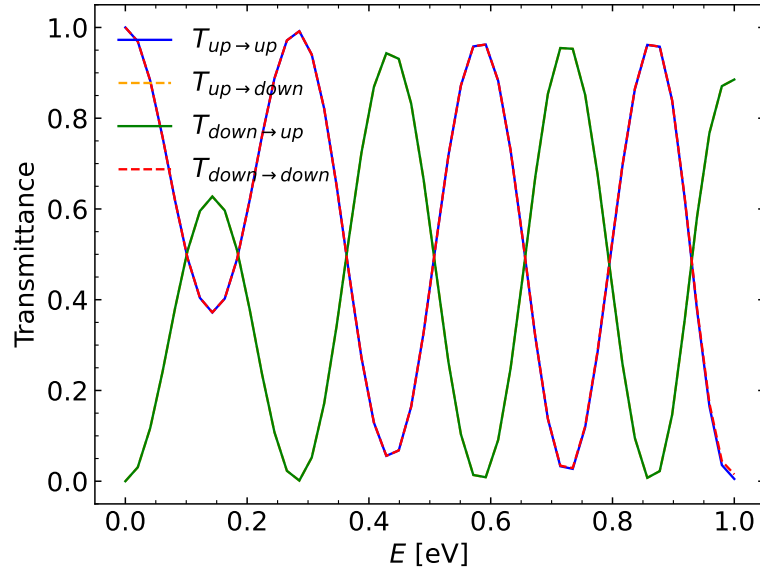


**Rysunek 2:** Relacje dyspersji  $E(k)$  dla ((a))  $\mathbf{B} = (B \ 0 \ 0)$ , ((b))  $\mathbf{B} = (0 \ B \ 0)$ , ((c))  $\mathbf{B} = (0 \ 0 \ B)$ , przy  $b = 1 \text{ T}$



**Rysunek 3:** Konduktancja w funkcji energii padającego elektronu dla  $B_z = 1 \text{ T}$

wartość  $B_y$  przykładaliśmy dla kolejnych wartości  $B_y \in [0, 1]$  T. Dodatkowo było ono przyłożone w obszarze  $[0.2, 0.8]$   $L$ . Wyznaczyliśmy zatem wartości współczynników transmitancji dla różnych kombinacji przejść (up-down, up-up, down-up, down-down). Współczynniki transmisji w funkcji  $B_y$  zostały przedstawione na rysunku 4. Przez precesję spinu zauważamy



**Rysunek 4:** Zależne od spinu współczynniki transmisji w funkcji pola magnetycznego  $B_y$  przy  $B_z = 1$  T oraz  $E = 5$  meV

naprzemiennie minima i maksima współczynników transmisji. Dla takiego układu ustaliliśmy dodatkowo  $B_y = 0.6$  T oraz zbadaliśmy gęstość ładunku o spinie up, down, co zostało przedstawione na rysunku 5. Ponownie obserwujemy precesję.



(a)

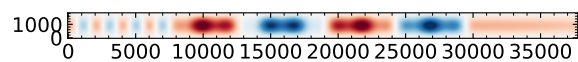
(b)

**Rysunek 5:** Rozkład gęstości elektronów o spinie (a) up i (b) down

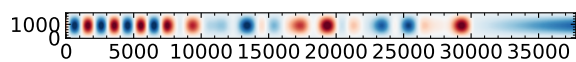
Następnie badamy gęstość spinu  $s_x, s_y, s_z$ , co zostało zapisane na rysunku 6. Gęstości spinów i gęstości elektronów o odpowiednich spinach to nie to samo, co potwierdzają wyniki.

## 2.2 Tranzystor spinowy oparty na ferromagnetycznych paskach

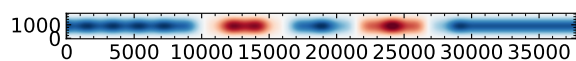
W kolejnym układzie badaliśmy wpływ pola zewnętrznego  $\mathbf{B}_{\text{ext}}$  oraz helikalnego  $\mathbf{B}_h = B_h \left[ \sin\left(\frac{2\pi(x-x_0)}{a}\right) \ 0 \ \cos\left(\frac{2\pi(x-x_0)}{a}\right) \right]$ . W pierwszym przypadku wyzerowaliśmy wartości  $\mathbf{B}_{\text{ext}} = (0 \ 0 \ B_{\text{ext}} = 0)$ . Ponownie - wyznaczyliśmy dla takiego układu relację dyspersji, co zostało zapisane na rysunku 7. Zauważamy rozszczepienie Zeemana, które widać szczególnie przy przybliżeniu na rysunku 7b. W kolejnej modyfikacji, badaliśmy wpływ pola  $B_{\text{ext}}$  zmieniając go przy  $B_{\text{ext}} \in [0, 0.1]$  T. Przyjęliśmy wartość energii jako połowę spinowo rozszczepionego stanu podstawowego i zapisywaliśmy konduktancję dla danej wartości. Zależność konduktancji od wartości pola  $B_{\text{ext}}$  została przedstawiona na rysunku 8. Zauważamy wartość



(a)

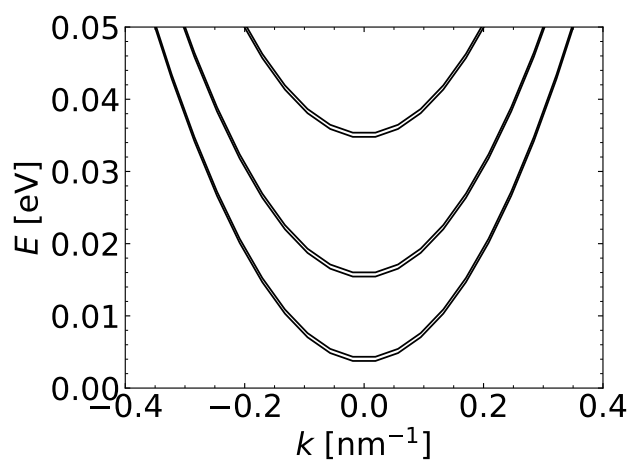


(b)

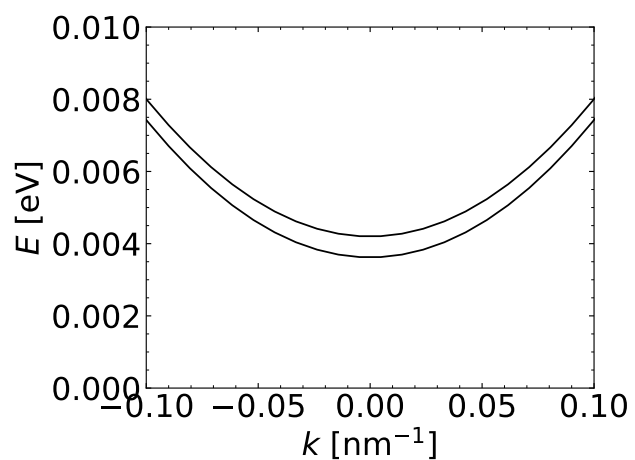


(c)

**Rysunek 6:** Rozkład gęstości spinów  $s_x, s_y, s_z$  w nanodrucie przy  $B_y = 0.6$  T,  $B_z = 0.1$  T,  $E = 5$  meV

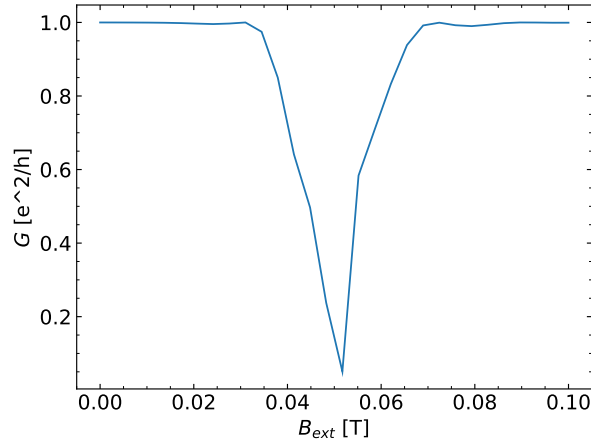


(a)



(b)

**Rysunek 7:** Relacja dyspersji  $E(k)$  przy  $B_{\text{ext}} = 0$

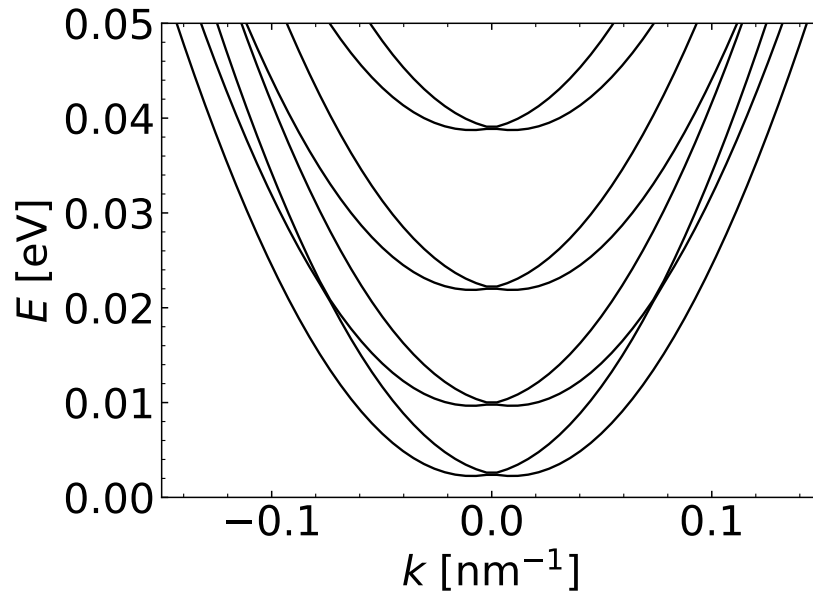


**Rysunek 8:** Wykres konduktancji w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego  $B_{\text{ext}}$  przy  $E = 0.004$  eV

konduktancji na poziomie 1 przy małych i dużych wartościach  $B_{\text{ext}}$ . Obserwujemy jednak nagły spadek konduktancji przy  $B_{\text{ext}} \sim 0.05$  mT, które jest równe wartości  $B_h$ .

### 2.3 Tranzystor spinowy oparty na oddziaływaniu spin-orbita

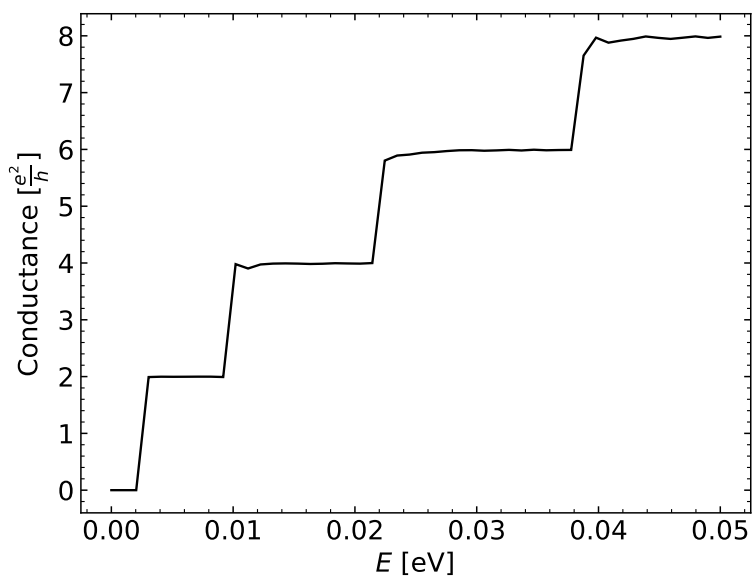
Ostatni układ jaki został analizowany był tranzystor spinowy oparty na oddziaływaniu spin-orbita. Zatem zamiast przykładania pola magnetycznego w tranzystorach (co by zwiększyło jego rozmiar), chcieliśmy sterować spinem poprzez oddziaływanie spin-orbita typu Rashby. Parametrem opisującym własności transportowe będzie  $\alpha$ . W pierwszej kolejności wyznaczyliśmy relację dyspersji, co zostało przedstawione na rysunku 9. Obserwujemy przesunięte paraboliczne relacje w



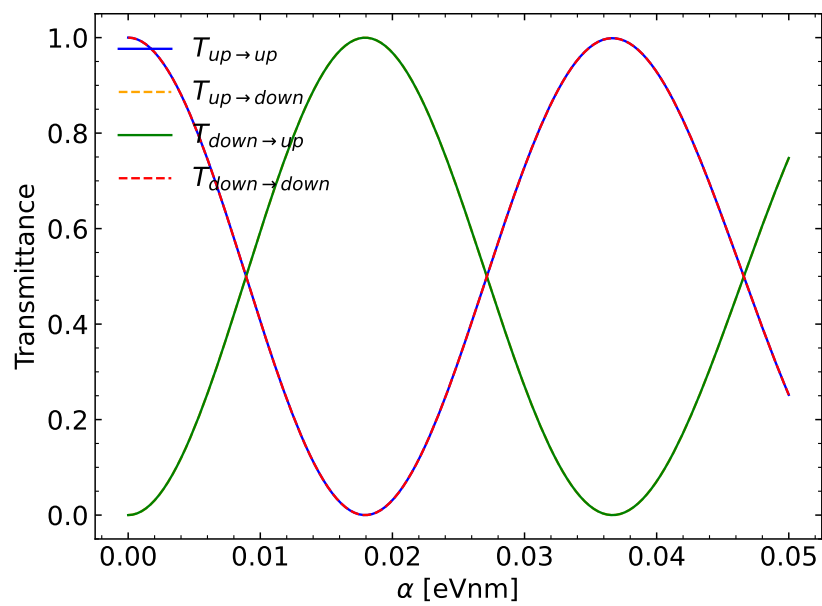
**Rysunek 9:** Relacje dyspersji  $E(k)$  w kanale z uwzględnieniem oddziaływania spin-orbita

kierunku dodatnich i ujemnych  $k$ . Następnie badaliśmy konduktancję w funkcji padającego elektronu - rys. 10. Zauważamy kolejne schodki konduktancji.

W kolejnej części wyznaczyliśmy współczynniki transmisji dla różnych kombinacji przejść elektronu w funkcji parametru  $\alpha$ . Przyjeliśmy oddziaływanie spin-orbita w obszarze  $0.2, 0.8$  L. Wyniki zostały zapisane na rysunku 11. Ponownie



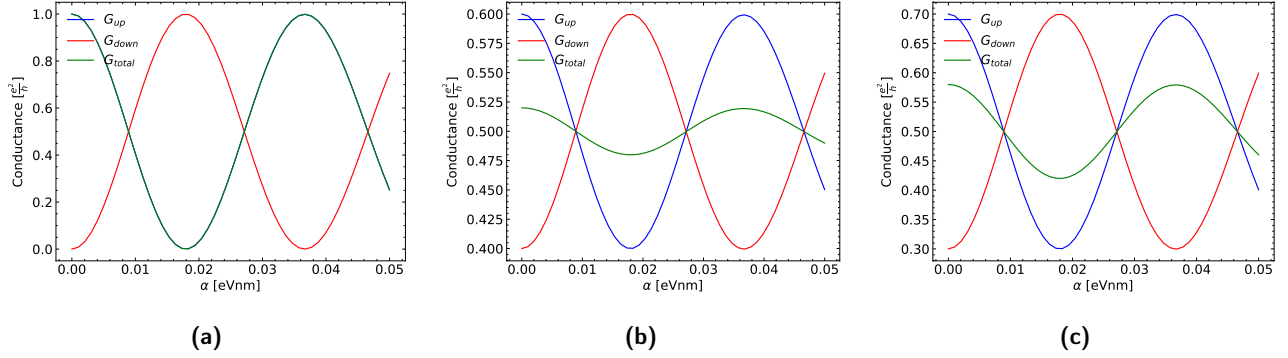
**Rysunek 10:** Konduktancja w funkcji energii padającego elektronu



**Rysunek 11:** Zależne od spinu współczynniki transmisji w funkcji parametru  $\alpha$  przy  $E = 5$  meV

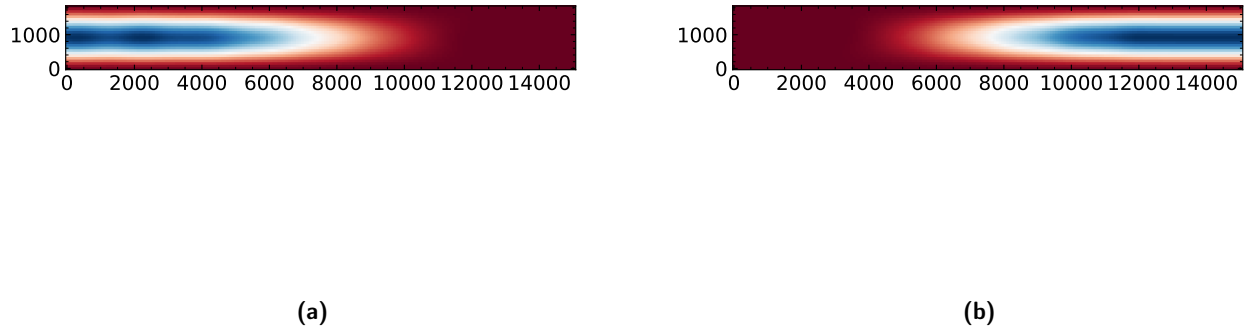
występują oscylacyjny charakter krzywych. Wyraźnie widać, że dla niektórych wartości  $\alpha$  elektron zmienia spin na przeciwny.

Analizowaliśmy konduktancje  $G, G^{\text{up}}, G^{\text{down}}$  dla różnych wartościach polaryzacji kontaktów  $P = \{0.2, 0.4, 1.\}$ . Wyniki zostały zapisane na rysunku 12. Dla wartości  $\alpha$  odpowiadającej całkowitemu obrotowi spinu, zapisaliśmy gęstość

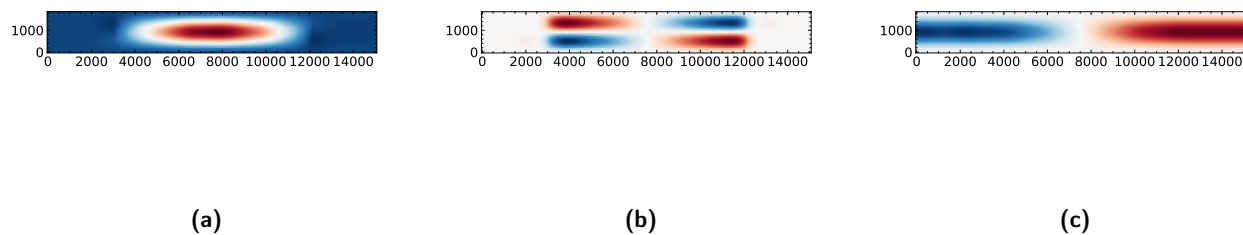


**Rysunek 12:** Zależna od spinu konduktancja oraz konduktancja całkowita funkcji parametru  $\alpha$  przy  $E = 5$  meV dla (a)  $P = 1$ ; (b)  $P = 0.2$ , (c)  $P = 0.4$

elektronu 13 oraz gęstość spinu 14. Wyraźnie zauważamy zmianę spinu w środku układu.



**Rysunek 13:** Zależna od spinu gęstość ładunku w nanourządzeniu przy  $E = 5$  meV (a) spin up (b) spin down



**Rysunek 14:** Gęstość spinu w nanourządzeniu przy  $E = 5$  meV **(a)**  $s_x$ , **(b)**  $s_y$ , **(c)**  $s_z$

### 3 Podsumowanie

W ćwiczeniu zdefiniowaliśmy układy nanourządzeń spintroniki za pomocą biblioteki `kwant`. Badaliśmy także parametry charakteryzujące układ, jak relacje dyspersji, konduktancje i wpływ na te wartości przy przyłożonych polach magnetycznych.