

# Raport z udziału w badaniach naukowych: Symulacja interferometru Fabry-Perota w grafenie w pakiecie „Kwant”

Kacper Połuszejko, 412183

## 1 Wstęp

W heterozłączach grafenowych typu  $p-n$  szczególne znaczenie ma tunelowanie Kleina. Dla idealnie prostego złącza pęd równoległy do granicy jest zachowany, a zatem zachowana jest poprzeczna składowa wektora falowego  $k_y$ . Nośniki padające normalnie na złącze ( $k_y = 0$ ) nie mogą ulec rozpraszaniu wstecznemu i przechodzą przez barierę z prawdopodobieństwem bliskim jedności. Dla padania skośnego transmisja ulega tłumieniu, a dla gładkiego profilu potencjału (w skali stałej sieci) prowadzi to do efektu kolimacji kanałów przewodzących. W przybliżeniu półklasycznym prawdopodobieństwo transmisji przez pojedyncze złącze można zapisać jako funkcję  $k_y$  w postaci wykładniczej [1]

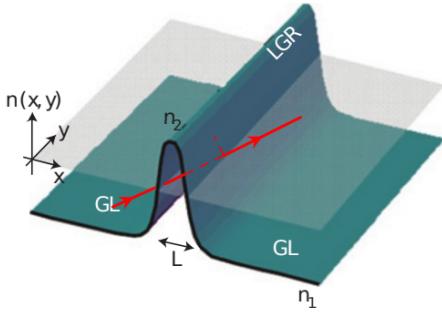
$$|T(k_y)|^2 = \exp\left(-\frac{\pi\hbar v_F k_y^2}{eE}\right), \quad (1)$$

gdzie  $E$  oznacza efektywne pole elektryczne w obszarze złącza. Zależność ta wskazuje, że struktura  $p-n$  działa jak filtr kątowy, przepuszczając głównie nośniki o małych  $|k_y|$ .

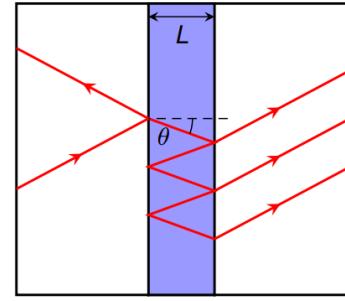
W układzie  $p-n-p$  (lub  $n-p-n$ ) dwa złącza tworzą rezonator dla fal elektronowych. Częściowe odbicia na obu granicach powodują interferencję, analogiczną do rezonatora Fabry'ego-Pérota w optyce. W formalizmie Landauera konduktancję wyraża się sumą transmisji po kanałach poprzecznych, natomiast oscylacyjna część konduktancji związana z interferencją może zostać zapisana w postaci [1]

$$G_{\text{osc}} = \frac{8e^2}{h} \sum_{k_y} |T_+|^2 |T_-|^2 |R_+||R_-| \cos(\theta_{\text{WKB}} + \Delta\theta_{\text{rf}}) \exp\left(-\frac{2L}{l_{\text{LGR}}}\right), \quad (2)$$

gdzie  $T_{\pm}$  i  $R_{\pm}$  są amplitudami transmisji i odbicia na dwóch złączach,  $L$  jest efektywną długością komory,  $l_{\text{LGR}}$  oznacza efektywną długość drogi swobodnej (w "locally gated region"),  $\theta_{\text{WKB}}$  jest fazą półklasyczną akumulowaną pomiędzy złączami, a  $\Delta\theta_{\text{rf}}$  stanowi wkład fazowy związany z odbiciem Kleina. W obecności pola magnetycznego  $B$  trajektorie nośników ulegają zakrzywieniu, co zmienia warunki interferencji i może prowadzić do przesunięć fazy prążków transmisyjnych, stanowiących eksperymentalną sygnaturę tunelowania bezodbiciowego.



**Rysunek 1:** Schematyczny profil gęstości nośników  $n(x, y)$  w grafeniu: dwa obszary zewnętrzne (GL) o koncentracji  $n_1$  oraz obszar lokalnie bramkowany (LGR) o koncentracji  $n_2$ . Różnica  $n_1$  i  $n_2$  tworzy dwa złącza  $p - n$ , a odległość  $L$  wyznacza długość komory. (rys. za [1]).



**Rysunek 2:** Balistyczny rezonator  $p-n-p$  w grafenie: obszar pod bramką o długości  $L$  jest ograniczony dwoma złączami, na których nośniki odbijają się i transmitują. Wielokrotne odbicia dla trajektorii padających pod kątem  $\theta$  prowadzą do interferencji Fabry'ego-Pérota i oscylacji konduktancji. (rys. za [3]).

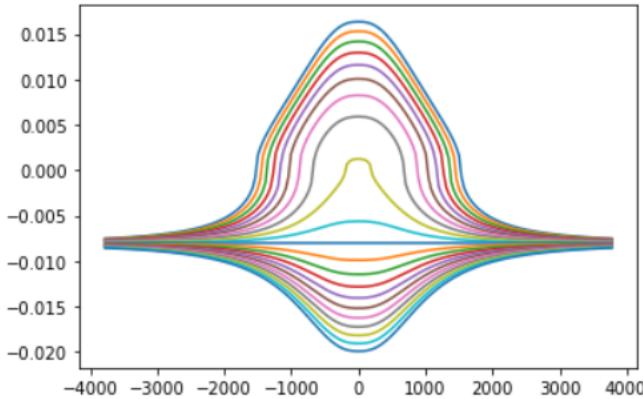
## 2 Metodyka

W niniejszym ćwiczeniu analizowany jest transport balistyczny w grafenowym heterozłączu z potencjałem sterowanym napięciami bramek górnej  $V_{tg}$  i dolnej  $V_{bg}$ . Profil gęstości nośników  $n(x)$  przyjęto zgodnie z [1], natomiast zależność potencjału  $V(x)$  od  $n(x)$  zgodnie z [2]:

$$n(x) = \frac{C_{TG} V_{TG}}{1 + \left| \frac{x}{w} \right|^{2.5}} + C_{BG} V_{BG}, \quad (3)$$

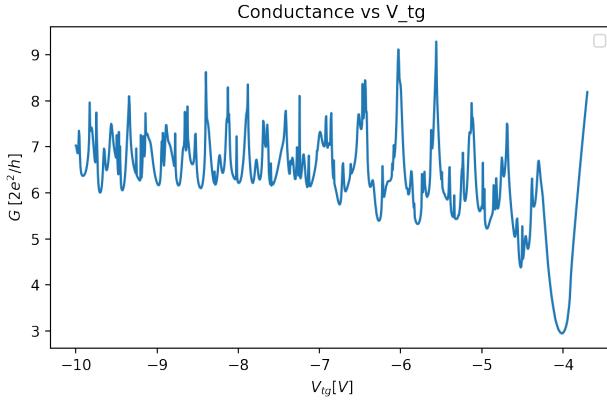
$$V(x) = -\text{sgn}(n(x)) \hbar v_F \sqrt{\pi |n(x)|}. \quad (4)$$

Abytrzymać prawidłowy wynik, należy jeszcze podzielić  $C_{BG}$  oraz  $C_{TG}$  przez ładunek elementarny  $e$ .

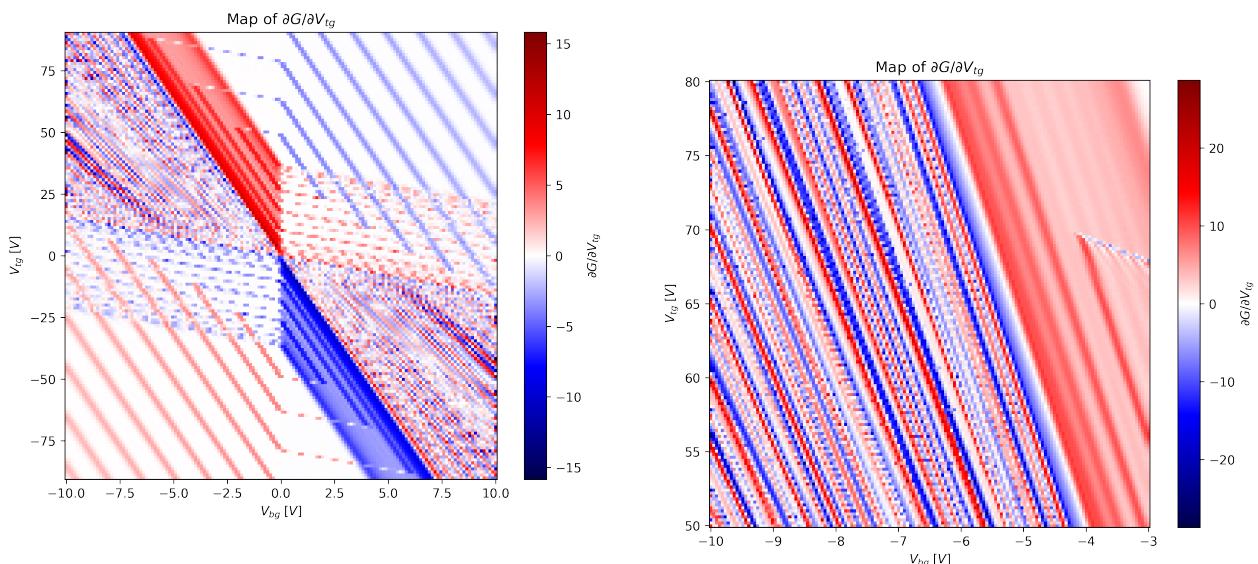


**Rysunek 3:** Na rysunku przedstawiono profil potencjału  $V(x)$  wzdłuż kierunku transportu dla różnych wartości napięcia bramki górnej  $V_{TG}$  przy stałym  $V_{BG} = 80$  V. Zmiana  $V_{TG}$  modyfikuje wysokość oraz znak potencjału w obszarze lokalnie bramkowanym, podczas gdy daleko od bramki potencjał dąży do wartości wyznaczonej głównie przez  $V_{BG}$ . Wraz ze wzrostem  $|V_{TG}|$  rośnie kontrast potencjału w centralnym obszarze, co prowadzi do powstawania dwóch złącz  $p - n$  i wyznacza efektywną długość komory rezonansowej.

### 3 Wyniki

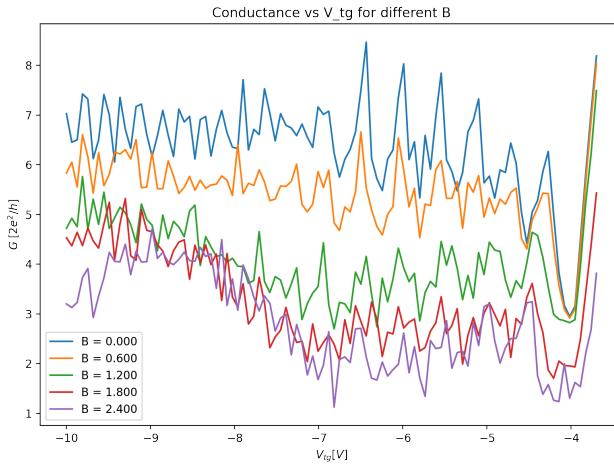


**Rysunek 4:** Zależność konduktancji  $G$  od napięcia bramki górnej  $V_{TG}$  przy stałym  $V_{BG} = 50$  V. W analizowanym zakresie obserwowane są oscylacje  $G(V_{TG})$ , które wynikają z interferencji nośników w obszarze lokalnie bramkowanym i są charakterystyczne dla rezonatora Fabry'ego-Pérota w strukturze  $p-n-p$ . Oscylacje utrzymują się w zakresie przedstawionym na rysunku, natomiast dla wyższych wartości obserwujemy już znaczny skok konduktancji i zanik oscylacji (co jest dobrze widoczne również na Rys.(6)). Zaobserwowany zakres występowania oscylacji jest jakościowo zgodny z wynikami przedstawionymi w literaturze [1].



**Rysunek 5:** Mapa  $\partial G / \partial V_{TG}$  w funkcji napięć bramek  $V_{TG}$  oraz  $V_{BG}$ . Ukośne prążki odpowiadają oscylacjom konduktancji wynikającym z interferencji nośników w strukturze  $p-n-p$  (rezonator Fabry'ego-Pérota). Otrzymany wykres jest zgodny z wynikami literaturowymi [1].

**Rysunek 6:** Mapa  $\partial G / \partial V_{TG}$  dla zawężonego zakresu napięć  $V_{TG}$  i  $V_{BG}$ , umożliwiająca dokładniejszą obserwację prążków interferencyjnych.



**Rysunek 7:** Na rysunku przedstawiono konduktancję  $G(V_{TG})$  dla kilku wartości pola magnetycznego  $B$  przy stałym  $V_{BG} = 50$  V. Widoczne oscylacje zmieniają swoje położenie wraz ze wzrostem  $B$ , co oznacza przesunięcie fazy prążków interferencyjnych. Jest to związane z zakrzywieniem trajektorii nośników w polu magnetycznym oraz zmianą fazy akumulowanej pomiędzy złączami w rezonatorze  $p - n - p$ , co modyfikuje warunki konstruktywnej interferencji [1].

## 4 Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają obecność oscylacji konduktancji charakterystycznych dla interferencji w strukturze  $p-n-p$  w grafeniu. Widoczna struktura prążków na mapach  $\partial G / \partial V_{TG}$  (**Rys. (5)** **Rys. (6)**) wskazuje na poprawne odtworzenie warunków rezonansowych oraz ich zależności od napięć bramek. Dodatkowo zaobserwowano przesunięcie fazy oscylacji wraz ze wzrostem pola magnetycznego, co jest zgodne z oczekiwany wpływem  $B$  na warunki interferencji w rezonatorze. Otrzymane rezultaty można uznać za jakościowo zgodne z opisem zjawiska oscylacji Kleina w literaturze [1].

## Literatura

- [1] Young, Andrea F., and Philip Kim. *Quantum interference and Klein tunnelling in graphene heterojunctions*. Nature Physics **5**(3) (2009), 222–226.
- [2] Liu, Ming-Hao, and Klaus Richter. *Efficient quantum transport simulation for bulk graphene heterojunctions*. Physical Review B **86**(11) (2012), 115455.
- [3] A.Mreńca-Kolasińska. Materiały do wykładu z kursu pt. "komputerowe symulacje układów nano- i mezoskopowych"(2025), Akademia Górnictwo Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej.