

Dwuwarstwowy grafen

Alina Mreńca-Kolasińska

27 kwietnia 2023, ostatnia aktualizacja 18 czerwca 2024

Plan

1 Dwuwarstwowy grafen (tzw. ułożenie Bernala)

- Własności

2 Dwuwarstwowy skręcony grafen

- Skręcony pod magicznym kątem
- Marginalnie skręcony
- Skręcony pod dużym kątem

Plan

1 Dwuwarstwowy grafen (tzw. ułożenie Bernala)

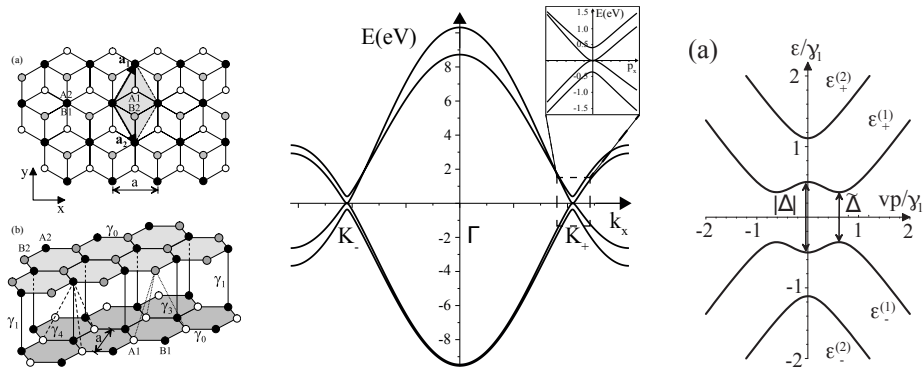
- Własności

2 Dwuwarstwowy skręcony grafen

- Skręcony pod magicznym kątem
- Marginalnie skręcony
- Skręcony pod dużym kątem

Struktura pasmowa

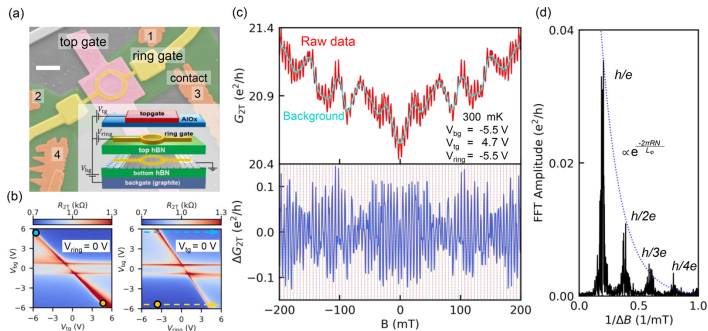
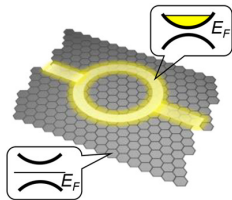
E. McCann Phys. Rev. B 74, 161403(R) (2006), E. McCann, M. Koshino, Rep. Prog. Phys. 76 056503 (2013)



- Dla niskich energii (w okolicy punktu K) kwadratowa relacja dyspersji
- Różnica potencjałów między warstwami – powstanie przerwy energetycznej

Elektrostatyczny pierścień

S. Iwakiri et al, Nano Lett. 22, 15, 6292 (2022)



Plan

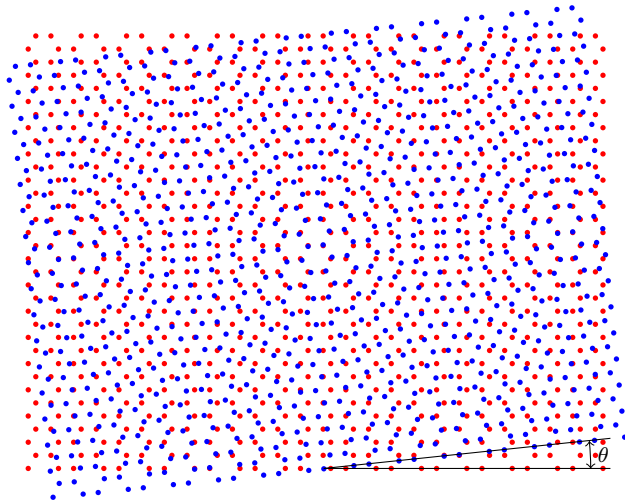
1 Dwuwarstwowy grafen (tzw. ułożenie Bernala)

- Własności

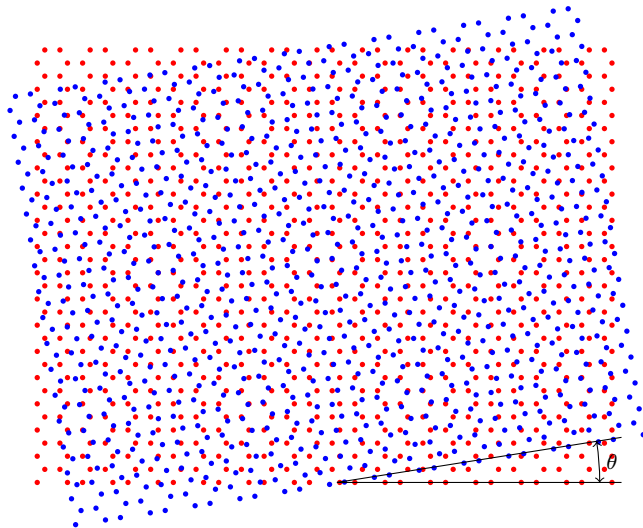
2 Dwuwarstwowy skręcony grafen

- Skręcony pod magicznym kątem
- Marginalnie skręcony
- Skręcony pod dużym kątem

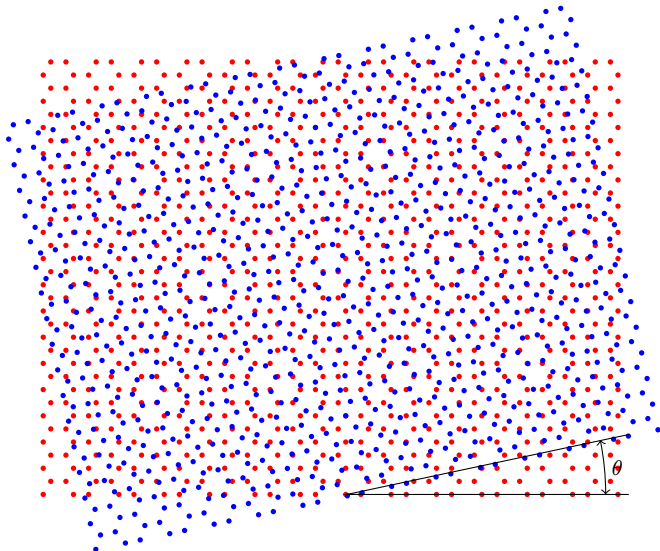
Supersieć moiré



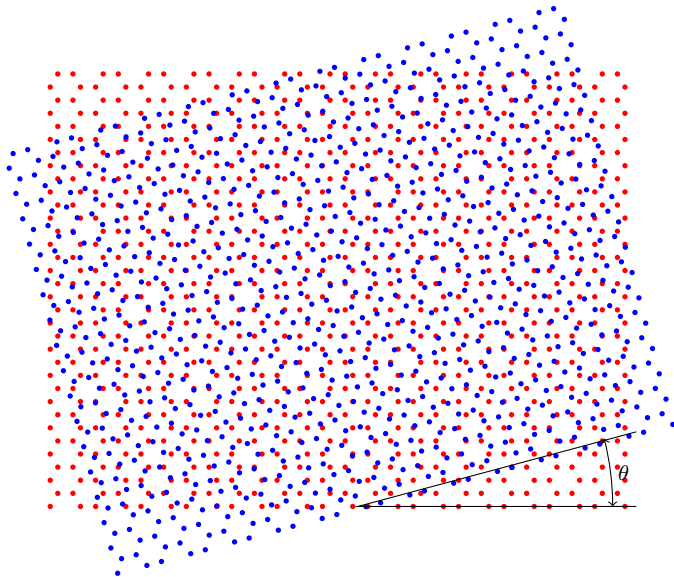
Supersieć moiré



Supersieć moiré



Supersieć moiré



Dwuwarstwowy grafen: zakresy

- Marginalnie skręcony ($\theta \ll 1^\circ$)
 - sieć stanów topologicznych
- Skręcony pod magicznym kątem ($\theta \approx 1.1^\circ, 0.5^\circ, 0.35^\circ, \dots$)
 - niekonwencjonalne nadprzewodnictwo
 - silnie skorelowany izolator
- Skręcony pod małym kątem
- Skręcony pod dużym kątem ($\theta \gtrsim 5^\circ$)
 - brak sprzężenia między warstwami

„Twistronics”

Plan

1 Dwuwarstwowy grafen (tzw. ułożenie Bernala)

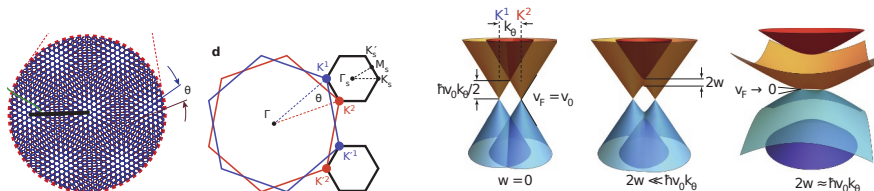
- Własności

2 Dwuwarstwowy skręcony grafen

- Skręcony pod magicznym kątem
- Marginalnie skręcony
- Skręcony pod dużym kątem

Struktura pasmowa

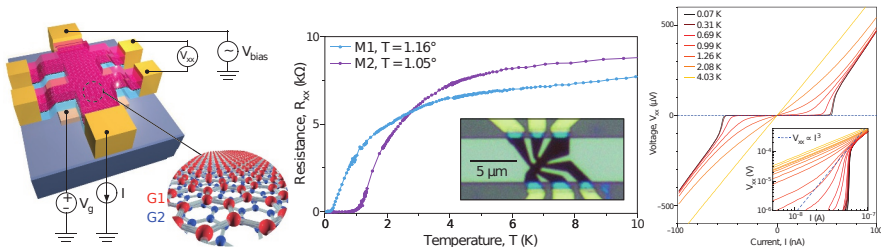
Y. Cao *et al*, Nature 556, 80 (2018)



- Mini-strefa Brillouina – dla sieci odwrotnej do supersieci moiré
- Dla niskich energii: stożki Diraca dla obu warstw obrócone względem punktu Γ
- stożki Diraca mieszają się przez hybrydyzację międzywarstwową
 - otwarcie przerwy energetycznej w okolicy przecięcia stożków
 - renormalizacja prędkości Fermiego v_F w punktach Diraca
- Gdy energia hybrydyzacji $2w \gtrsim \hbar v_0 k_\theta$ – płaskie pasma
 - prędkość Fermiego $v_F \approx 0$ – kąt magiczny

Dwuwarstwowy grafen skręcony pod magicznym kątem

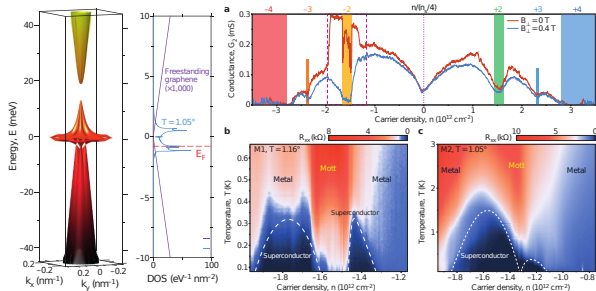
Y. Cao, ..., P. Jarrillo-Herrero, Nature 556, 43 (2018)



Schemat próbki, rezystancja w funkcji temperatury ($n = -1.44 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) oraz charakterystyka prądowo-napięciowa dla 1.05° (dla $T = 70 \text{ mK}$ prąd krytyczny 50 nA)

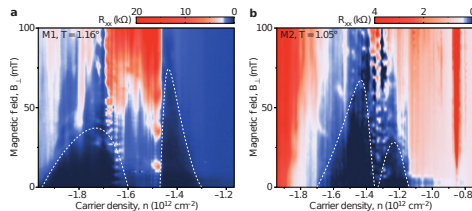
- Kontakty Au/Cr (nie-nadprzewodzące)
- Kąt skręcenia warstw: 1.05° , 1.16°
- Niekonwencjonalne nadprzewodnictwo ($T_k = 1.7 \text{ K}$ i 0.5 K)

Temperatura krytyczna



- Płaskie pasma (szerokość 5-10 meV), gdy θ „kąt magiczny”
- Przerwa energetyczna dla $n = n_s$ (jedenoczątkowa); $n = n_s/2$ w wyniku silnego oddziaływania kulombowskiego
- Dla gęstości elektronowej ustalonej w okolicy $n = n_s/2$, układ w stanie nadprzewodzącym ($n_s = 4/A$, $A \approx \sqrt{3}a^2/(2\theta^2)$ -pole komórki elementarnej moiré, $a = 0.246$ nm)
- $n_s/2 \approx (1.2 - 1.6) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, rząd wielkości niższy od np. złącza $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$

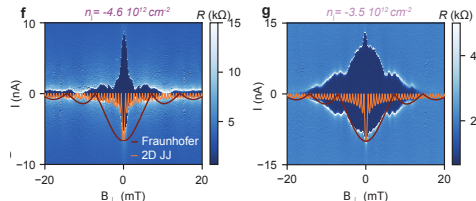
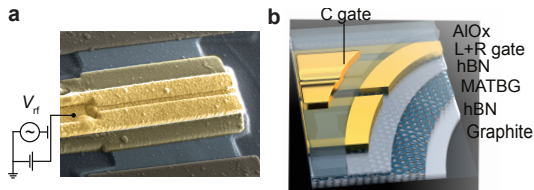
Pole krytyczne



- Zewnętrzne prostopadłe pole magnetyczne tworzy wiry i tłumi nadprzewodnictwo.
- Pole krytyczne zmienia się z gęstością, max. pole krytyczne $\approx 70\text{mT}$
- W okolicy stanu izolatora widoczne oscylacje
 - interpretacja: gęstość elektronowa nie jest jednorodna w próbce.
 - powstają „wyspy” izolatora w otoczeniu nadprzewodnika – wiele złączy Josephsona – interferencja (podobnie do SQUID).

Elektrostatycznie sterowane złącze Josephsona

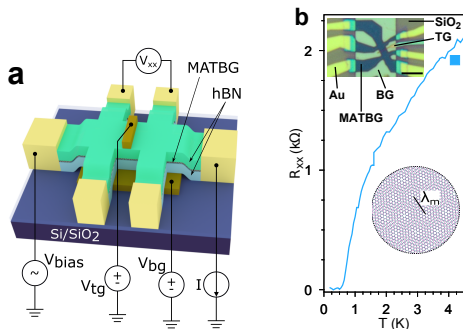
F.K. de Vries *et al*, Nat. Nanotechnol. **16**, 760 (2021)



- Złącze kontrolowane przez bramki: bottom gate, L,R gates (gęstość w leadach), C gate (gęstość w centrum)
 - wymiary: długość $L_j = 100 \text{ nm}$, szerokość $W = 2.3 \text{ }\mu\text{m}$
- Prąd I_s modulowany (wzór Fraunhofera o okresie $\Delta B_{\perp}$),
 - Złącze 3D: $\Delta B_{\perp} = h/2e/(L_j W)$, maxima prądu $\propto 1/B_{\perp}$
 - Złącze 2D: $\Delta B_{\perp} = 1.8\Phi_0/W^2$, maxima prądu $\propto 1/B_{\perp}^{1/2}$
- Złącze w pracy:
 - $n = -4.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$: maxima $\propto 1/B_{\perp}^{1/2}$, ale okres się nie zgadza
 - $n = -3.48 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$: okres i skalowanie niezgodne z żadnym z modeli

Kolejne złącze Josephsona

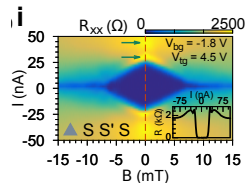
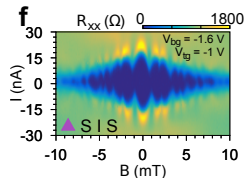
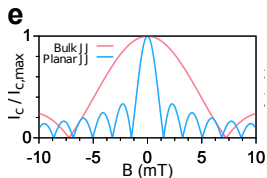
D. Rodan-Legrain *et al*, Nat. Nanotechnol. **16**, 769 (2021) – data publikacji j.w.



- Dwie bramki elektrostatische
 - Dolna – kontroluje globalną gęstość w próbce
 - Górna (wąska ≈ 160 nm) bramka – dla niezależnej kontroli centralnego obszaru
- (b) Opór przy $V_{tg} = 0$; $T_c \approx 0.85$ K

Kolejne złącze Josephsona

D. Rodan-Legrain *et al*, Nat. Nanotechnol. **16**, 769 (2021)



- (e) porównanie obliczonego prądu krytycznego dla złącza 2D (okres oscylacji $1.8\Phi_0/W^2$) i 3D (Φ_0/WL)
- (f) Prąd zmierzony dla układu w stanie S-I-S (S–nadprzewodnik, I–izolator)
 - Autorzy podsumowali, że zmierzony okres 1 – 1.5 mT zgadza się z oczekiwanym 1.7 mT dla 2D ($W \approx 1.5\mu\text{m}$)
- (i) Prąd zmierzony dla układu w stanie S-S'-S (S–nadprzewodnik, S'–nadprzewodnik ale o innej gęstości elektronów)
 - Zachowuje się jak 3 nadprzewodniki połączone szeregowo

Plan

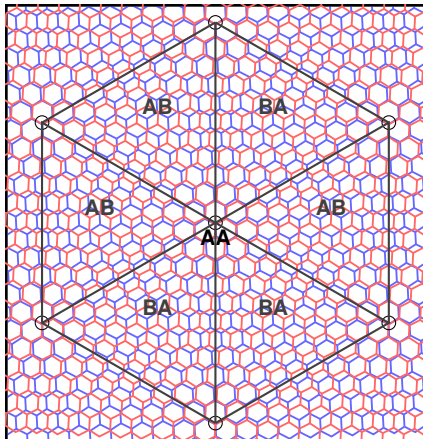
1 Dwuwarstwowy grafen (tzw. ułożenie Bernala)

- Własności

2 Dwuwarstwowy skręcony grafen

- Skręcony pod magicznym kątem
- **Marginalnie skręcony**
- Skręcony pod dużym kątem

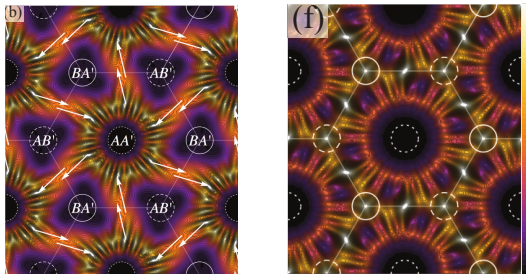
Marginalnie skręcony dwuwarstwowy grafen



- Na rysunku obok kąta skręcenia jest duży dla ilustracji
- Powstają obszary o ułożeniu Bernala (AB lub BA) oraz ułożeniu AA
- Przyłożenie napięcia między warstwami wywołuje lokalną przerwę energetyczną w obszarach AB / BA
- Obszary AA są przewodzące
- Przy małych kątach ($\theta \lesssim 1^\circ$) powstaje sieć modów uwięzionych wzdłuż granic AB / BA
 - topologiczne mody helikalne
 - każdy kanał przenosi prąd o przeciwnym kierunku dla obu dolin

Marginalnie skrzyżowany dwuwarstwowy grafen

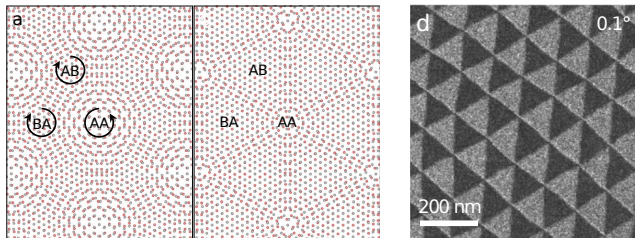
Pablo San-Jose and Elsa Prada, Phys. Rev. B **88**, 121408(R) (2013)



Przykładowa gęstość elektronowa obliczona dla $\theta \approx 0.2^\circ$, (b) różnicy energii $U = 180$ meV między warstwami (f) $U = 0$.

Rekonstrukcja sieci przy niskich kątach

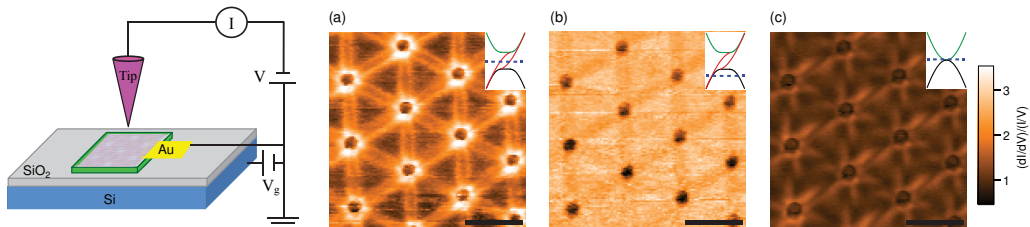
H. Yoo *et al*, Nat. Mater **18**, 448 (2019)



- (a, b) schematyczne diagramy położenia atomów przed i po rekonstrukcji.
- (d) obraz z mikroskopu elektronowego przedstawiający domeny AB i BA.
- autorzy prezentują także wyniki pomiarów transportu wskazujące na obecność sieci 1D modów.
- rekonstrukcja uwydatnia sieć 1D.

Obrazowanie sieci przez mikroskopię tunelową

S. Huang *et al*, Phys. Rev. Lett. **121**, 037702 (2018)



Schemat układu pomiarowego STM, mapy lokalnej gęstości stanów w przerwie energetycznej i poza nią. Struktura pasmowa (inset) ukazana jest dla jednej doliny (czerwone linie: stany helikalne)

- Energia w przerwie: zwiększona gęstość stanów wzdłuż ścian domenowych łączących obszary AA
- Energia poza przerwą: zmniejsza się kontrast między obszarami AA i AB/BA (stany helikalne dla energii poza przerwą są zdelocalizowane).
- Jeszcze słabszy kontrast gdy brak przerwy energetycznej (brak stanów helikalnych).

Plan

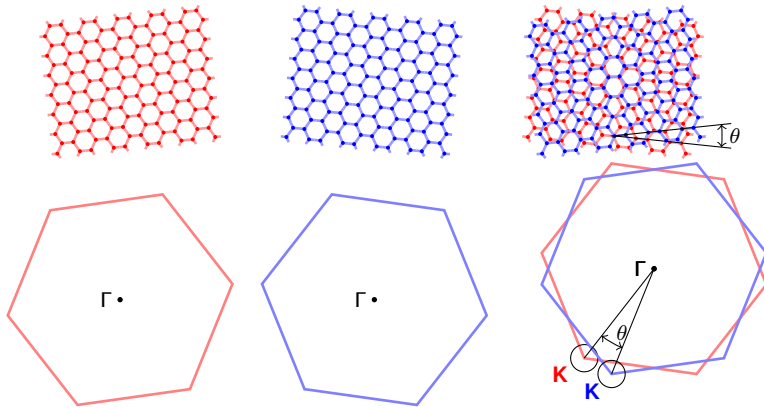
1 Dwuwarstwowy grafen (tzw. ułożenie Bernala)

- Własności

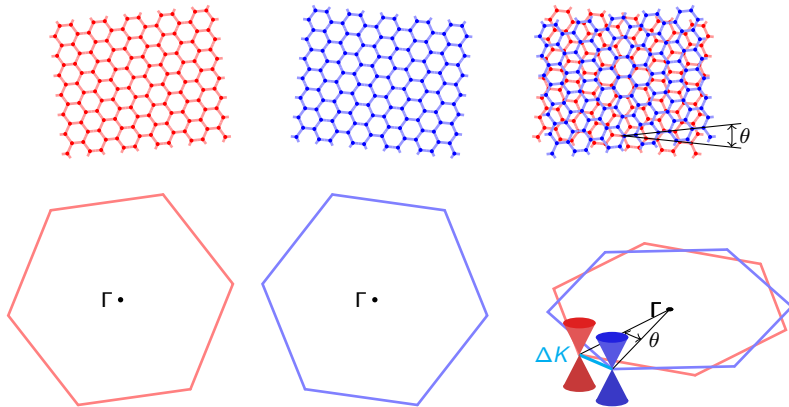
2 Dwuwarstwowy skręcony grafen

- Skręcony pod magicznym kątem
- Marginalnie skręcony
- Skręcony pod dużym kątem

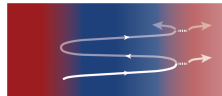
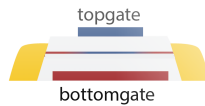
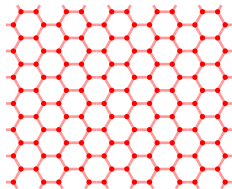
Twisted bilayer



Twisted bilayer

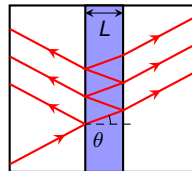
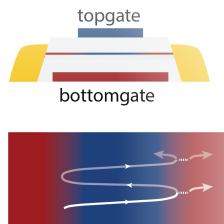
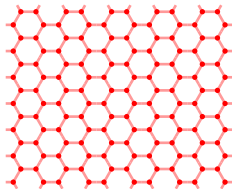


Fabry-Pérot, single layer graphene



1

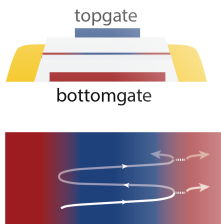
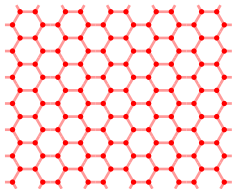
Fabry-Pérot, single layer graphene



- Różnica fazy:

$$\Delta\varphi = 2kL \cos(\theta)$$

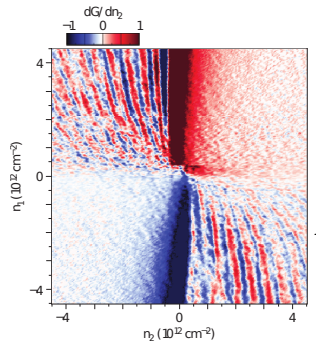
Fabry-Pérot, single layer graphene



- Różnica fazy:

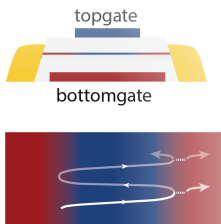
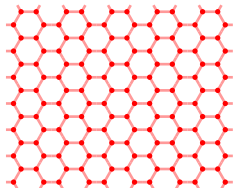
$$\Delta\varphi = 2kL \cos(\theta)$$

- Grafen: $k = \sqrt{\pi|n|}$



¹Young, A. et al. Nat. Phys. 5, 222 (2009).

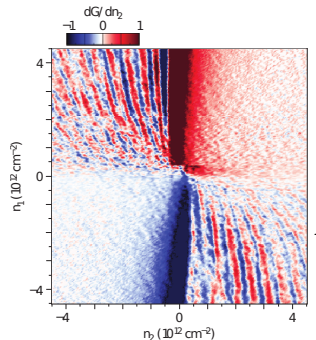
Fabry-Pérot, single layer graphene



- Różnica fazy:

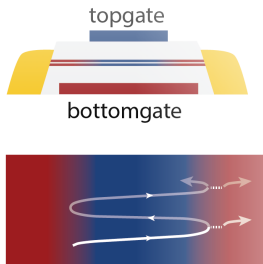
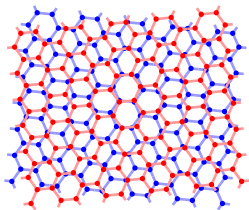
$$\Delta\varphi = 2kL \cos(\theta)$$

- Grafen: $k = \sqrt{\pi|n|}$
- Interferencja konstruktywna : $\Delta\varphi = 2j\pi, j = 1, 2, \dots$



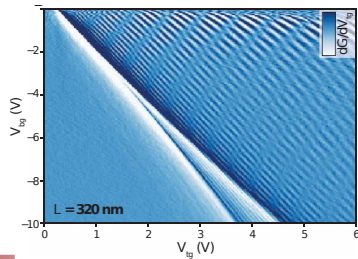
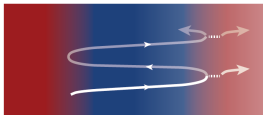
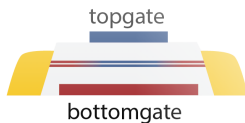
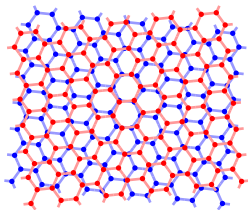
¹Young, A. et al. Nat. Phys. 5, 222 (2009).

Fabry-Pérot interference, twisted bilayer graphene



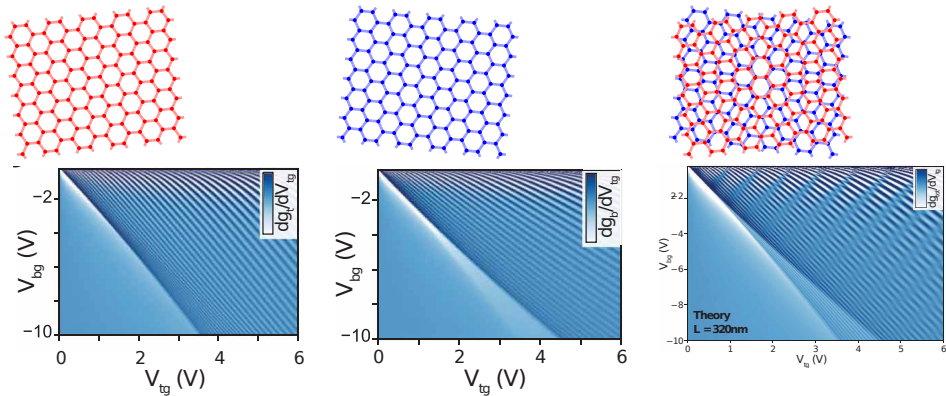
2

Fabry-Pérot interference, twisted bilayer graphene



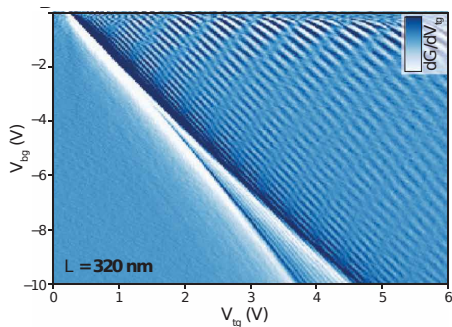
2

Simulation, twisted bilayer graphene

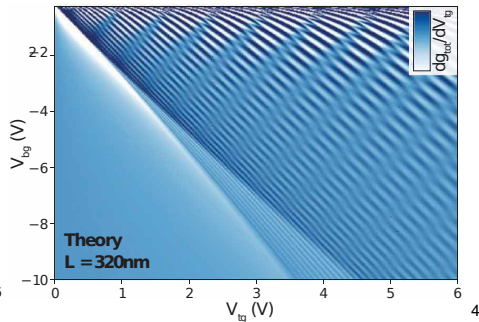


3

Fabry-Pérot interference, twisted bilayer graphene



Experiment



Calculation

Dziękuję za uwagę!