



POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ FIZYKI



PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

WŁASNOŚCI TRANSPORTOWE POJEDYNCZYCH
I WIELOKROTNYCH WARSTW GRAFENOWYCH

Autor:

Krzysztof GIBASIEWICZ

Promotor:

dr inż. Jarosław JUDEK

WARSZAWA, 1 sierpnia 2013

DEDYKACJA

This book is dedicated to one of the greatest mathematicians of all time: Carl Friedrich Gauss. Without him, this book wouldn't have been possible.

Dedykacja	i
Spis treści	ii
Wstęp	iv
1 Grafen	1
1.1 Struktura atomowa i własności mechaniczne	2
1.2 Struktura i własności elektroniczne	3
1.3 Grafen otrzymywany metodą CVD	4
1.3.1 Opis metody	5
1.3.2 Badania strukturalne grafenu	5
1.4 Zastosowania	5
2 Transzystor FET z kanałem grafenowym	6
2.1 Tradycyjny tranzystor FET z izolowaną bramką	6
2.2 Transzystor FET z kanałem grafenowym	6
2.3 Proces produkcji tranzystorów z kanałem grafenowym	6
2.3.1 Struktury tranzystorów	6
2.3.2 Metoda produkcji tranzystorów	6
3 Pomiary elektryczne tranzystorów	7
3.1 Charakterystyki przejściowe i wyjściowe	7
3.2 Proces wygrzewania prądowego tranzystorów grafenowych	7
3.3 Ewolucja charakterystyk elektrycznych tranzystorów grafenowych wystawionych na działanie atmosfery	7
4 Podsumowanie	8

<i>SPIS TREŚCI</i>	iii
Spis tablic	9
Spis rysunków	10
Bibliografia	11

Tutaj mają być jakieś słodkie ładne rzeczy o tym jaki to ten grafen jest super i jak ładnie zrewolucjonizuje elektronikę i ją zmniejszy żeby spełnione było prawo Moora.

Zgodnie z najnowszą definicją grafen to: „Cienka monowarstwa zbudowana z atomów węgla, ułożonych w dwuwymiarowej sieci o strukturze plastra miodu. Grafen jest podstawowym budulcem dla materiałów grafitowych o innych wymiarach. Może być zwinięty tworząc zerowymiarowe fullereny, zrolowany w jednowymiarowe nanorurki lub spiętrzony w stos tworząc trójwymiarowy grafit”¹

Ta definicja pokazuje, że grafen stanowił ważny materiał, zanim udało się znaleźć metodę jego otrzymywania,² ponieważ odgrywał ważną rolę w modelowaniu właściwości innych materiałów zbudowanych z węgla (fullereny, nanorurki).

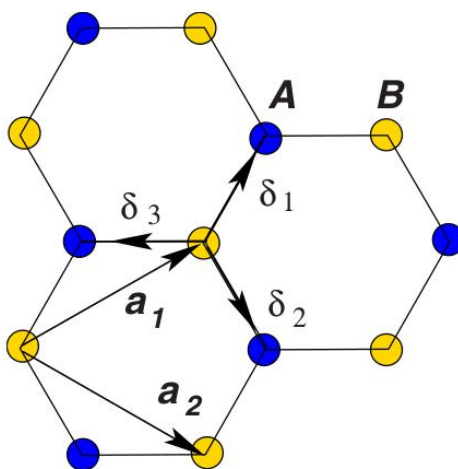
Poniższy rozdział ma na celu przybliżenie własności grafenu, dzięki którym możliwe zastosowania stanowią o niesamowitym zainteresowaniu ze strony dzisiejszych naukowców. Dodatkowo zostanie zaprezentowana i omówiona metoda jego otrzymywania, w której upatruje się największe nadzieje na otrzymywanie przemysłowych ilości tego niezwykłego materiału. Na sam koniec przedstawione zostaną niektóre z wielu zastosowań grafenu z naciskiem na tranzystory polowe z kanałem grafenowym, które stanowią główną oś niniejszej pracy.

¹(odnośnik do Geim, A. K. and Novoselov, K. S. (2007). "The rise of graphene". Nature Materials 6 (3): 183–191. Bibcode:2007NatMa...6..183G. doi:10.1038/nmat1849. PMID 17330084.)

²tutaj o początkach grafenu

1.1 Struktura atomowa i własności mechaniczne

Jeżeli skupimy się na pojedynczym atomie węgla tworzącym grafen, wtedy okaże się, że mamy do czynienia z hybrydyzacją typu sp^2 . Takie oddziaływanie między orbitalami s i p prowadzi do powstania bardzo silnych wiązań typu σ pomiędzy sąsiednimi atomami węgla. Te wiązania mają, zgodnie z zasadą Puliego, wypełnione powłoki elektronowe i tworzą głębokie pasmo walencyjne. Długość tego wiązania wynosi $1,42 \text{ \AA}$ i leżą one w jednej płaszczyźnie. To te wiązania decydują o tak dużej stabilności tego układu i o jego niezwykłych właściwościach mechanicznych. Wygląd tak powstałej sieci widoczny jest na rysunku 1.1.



Rysunek 1.1: Sieć atomowa grafenu

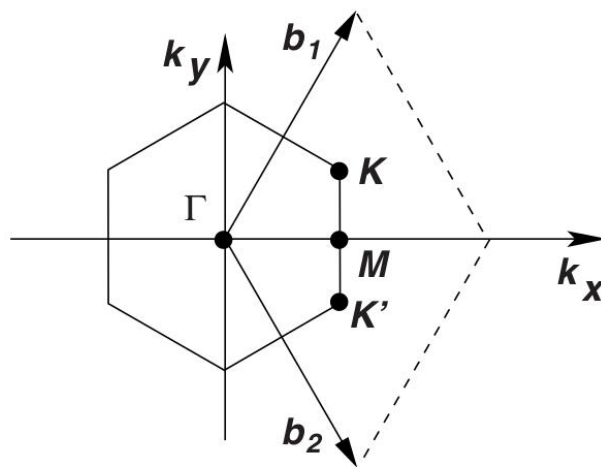
Na rysunku możemy zobaczyć, że sieć grafenu zbudowana jest z dwóch dwuwymiarowych sieci Bravais'ego (kolory niebieski i żółty), oznaczone literami A i B. Dodatkowo widoczne są wspomniane wcześniej trzy wiązania σ . Warto też wspomnieć o dwóch wektorach a_1 i a_2 , tworzących pojedynczą sieć Bravais'ego. O ile nie mają one, większego znaczenia dla samego opisu grafenu, o tyle warto o nich wspomnieć w kontekście nanorurek węglowych. Dzięki wielokrotnościom tych wektorów określa się tak zwany wektor chiralności nanorurki. Dzięki temu można poznać charakter nanorurki (metaliczna czy półprzewodnikowa).

Jako wynik takiej budowy sieci grafenu, jest on bardzo wytrzymały. Teoretycznie 100 razy bardziej wytrzymały niż stal o takiej samej grubości. Mimo wszystko jest on też bardzo lekki. Istnieje bardzo obrazowe porównanie obu tych właściwości. Gdyby wytworzyć grafenowy hamak o powierzchni 1 m^2 , to taki hamak byłby w stanie wytrzymać 4-kilogramowego kota. Jednocześnie sam hamak ważyłby mniej niż jego pojedynczy wąs. Dokładniej ważyłby $0,77 \text{ mg}$, jest to 10^5 raza mniej niż waga arkusza papieru o tej samej powierzchni.

1.2 Struktura i własności elektroniczne

Po utworzeniu 3 par typu sp^2 pozostaje jeden orbital typu p , będący prostopadły do powierzchni tworzonej przez wiązania typu σ . Wraz z niesparowanymi orbitalami typu p pochodzącymi od sąsiednich atomów, tworzy on zdelokalizowane wiązanie typu π . Wiązania typu π są znacznie słabsze niż wiązania typu σ . Dodatkowo są one wypełnione tylko w połowie elektronami. Dlatego właśnie to wiązanie decyduje o niezwykłych właściwościach elektronicznych grafenu.

Na początku omówienia właściwości elektronicznych grafenu warto przedstawić sieć odwrotną dla tego materiału. Schemat pierwszej strefy Brillouina znajduje się na rysunku 1.2.



Rysunek 1.2: Sieć odwrotna grafenu

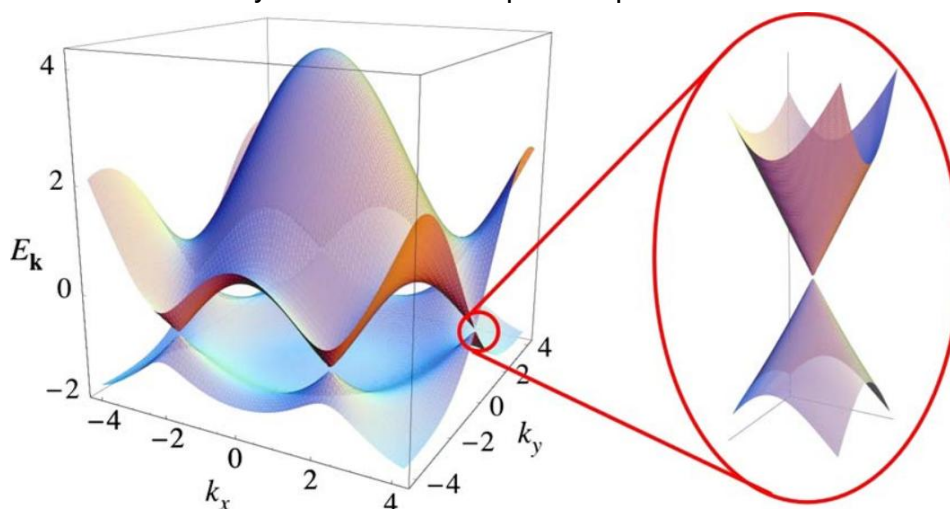
Zaznaczone są na nim punkty wysokiej symetrii (Γ , K i M). Dodatkowo pokazane zostały wektory b_1 i b_2 , opisujące sieć odwrotną. Warto zauważyć, że sieć odwrotna bardzo przypomina sieć atomową. Z geometrycznego punktu widzenia sieć odwrotna jest to obraz sieci atomowej obrócony o 30° . Operując w sieci odwrotnej można wyprowadzić zależność energii od położenia na płaszczyźnie wektora k . Najprostszą metodą otrzymania takiej zależności jest metoda ciasnego wiązania (*ang. Tight-binding method*). Prowadzi ona do następującej zależności energii:

$$E(\vec{k})_{\pm} = \pm t \sqrt{3 + f(\vec{k})} - t' f(\vec{k}) \quad (1.1)$$

$$f(\vec{k}) = 2 \cos(\sqrt{3} k_y a) + 4 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_y a\right) \cos\left(\frac{3}{2} k_x a\right) \quad (1.2)$$

Oznaczenie t występujące w zależności 1.1 jest to energia przeskoku pomiędzy danym atomem a jego najbliższym sąsiadem (zmiana podsięci). Natomiast t' jest to

energia przeskoku pomiędzy następnym najbliższym sąsiadem. Wartość $t \approx 2,8$ eV, natomiast $t' \approx 0,2$ eV. Na podstawie oby tych zależności 1.1, został narysowany wykres zależności energii w pierwszej strefie Brillouina, który został przedstawiony na rysunku 1.3. Dodatkowo zaznaczony został obszar w pobliżu punktu K.



Rysunek 1.3: Struktura pasmowa grafenu

Wyróżniony obszar to tak zwany stożek Diraca. Jest to w zasadzie najciekawsze miejsce na krajobrazie pasmowym z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze jest to miejsce, gdzie stykają się pasma przewodnictwa i walencyjne. Po drugie w pobliżu punktu K mamy do czynienia z liniową zależnością energii od wektora falowego. Najczęściej tą relację w przybliżeniu przedstawia się w następujący sposób:

$$E(\vec{k}) = \pm v_F |\vec{k}| \quad (1.3)$$

Gdzie $\vec{k} = \vec{K} + \vec{q}$ i jednocześnie $|\vec{q}| \ll |\vec{K}|$.

1.3 Grafen otrzymywany metodą CVD

Istnieje już dość duża liczba metod otrzymywania grafenu. Należy w tym miejscu wspomnieć chociażby o eksfoliacji (tak zwana metoda noblowska) i o metodzie opartej na węglu krzemu (SiC). Jednak najbardziej obiecującą metodą wytwarzania grafenu na potrzeby przemysłu wydaje się być aktualnie metoda CVD (*ang. Chemical Vapour Deposition*), czyli metoda osadzania z gazów. Poniżej zostanie opisana w sposób ogólny ta technologia, dodatkowo zostaną przedstawione wyniki charakteryzacji grafenu otrzymanego tą metodą.

1.3.1 Opis metody

1.3.2 Badania strukturalne grafenu

1.4 Zastosowania

ROZDZIAŁ 2

TRANZYSTOR FET Z KANAŁEM GRAFENOWYM

2.1 Tradycyjny tranzystor FET z izolowaną bramką

2.2 Tranzystor FET z kanałem grafenowym

2.3 Proces produkcji tranzystorów z kanałem grafenowym

2.3.1 Struktury tranzystorów

2.3.2 Metoda produkcji tranzystorów

Opis metodologii

Zdjęcia optyczne

ROZDZIAŁ 3

POMIARY ELEKTRYCZNE TRANZYSTORÓW

- 3.1 Charakterystyki przejściowe i wyjściowe**
- 3.2 Proces wygrzewania prądowego tranzystorów grafenowych**
- 3.3 Ewolucja charakterystyk elektrycznych tranzystorów grafenowych wystawionych na działanie atmosfery**

ROZDZIAŁ 4

PODSUMOWANIE

	SPIS TABLIC
--	-------------

SPIS RYSUNKÓW

1.1	Sieć atomowa grafenu	2
1.2	Sieć odwrotna grafenu	3
1.3	Struktura pasmowa grafenu	4

BIBLIOGRAFIA

D.E. Knuth. Typesetting concrete mathematics. *TUGboat*, 10(1):31–36, April 1989.