



POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ FIZYKI



PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

WŁASNOŚCI TRANSPORTOWE POJEDYNCZYCH
I WIELOKROTNYCH WARSTW GRAFENOWYCH

Autor:

Krzysztof GIBASIEWICZ

Promotor:

dr inż. Jarosław JUDEK

WARSZAWA, 8 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 Własności elektronowe	3
1.2.1 Struktura pasmowa	3
1.2.2 Ruchliwość	5
1.2.3 Minimalna przewodność i gęstość stanów	5
1.2.4 Przerwa energetyczna	6
1.2.5 Efekty środowiskowe	7
1.2.6 Inne właściwości	9
1.3 Metody otrzymywania grafenu	9
1.3.1 Eksfoliacja	10
1.3.2 Epitaksja na węglu krzemu	11
1.3.3 Metoda CVD	12
1.4 Zastosowania	14
2 Tranzystor grafenowy	17
2.1 Tranzystor FET	18
2.2 Tranzystor FET z kanałem grafenowym	21
2.2.1 Podstawy fizyczne działania	21
2.2.2 Najważniejsze właściwości	23
Ruchliwość	23
Przerwa energetyczna	23

Dwuwymiarowość	23
2.2.3 Omówienie charakterystyk elektrycznych	24
2.2.4 Proponowane modele transportu	25
Model Drudego	25
Model stałej ruchliwości	26
Model ruchliwości Halla	26
Metoda techniczna (to jest chyba do zmiany!)	26
2.3 Najnowsze technologie tranzystorów grafenowych	27
2.4 Proces produkcji tranzystorów z kanałem grafenowym	29
2.4.1 Produkcja grafenu i transfer	29
2.4.2 Nałożenie kontaktów drenu i źródła	30
2.4.3 Wytwarzanie kanału	30
3 Pomiary elektryczne tranzystorów	33
3.1 Opis stanowiska pomiarowego	33
3.2 Charakterystyki przejściowe i wyjściowe	33
3.3 Proces wygrzewania prądowego tranzystorów grafenowych	33
3.4 Ewolucja charakterystyk elektrycznych tranzystorów grafenowych wystawionych na działanie atmosfery	33
4 Podsumowanie	34
Spis tablic	35
Spis rysunków	36

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, jeszcze zanim udało się znaleźć metodę jego otrzymywania,² ponieważ odgrywał ważną rolę w modelowaniu właściwości innych materiałów zbudowanych z węgla (fullereny, nanorurki).

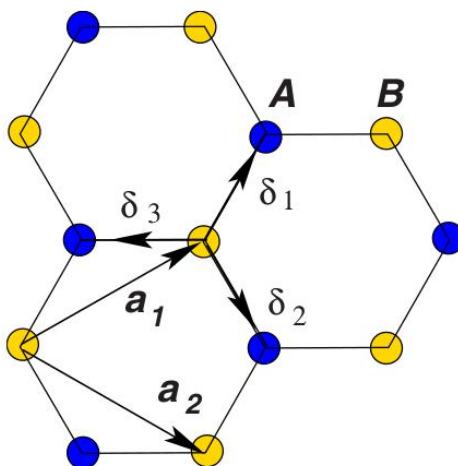
Poniższy rozdział ma na celu przybliżenie własności grafenu, dzięki którym możliwe zastosowania stanowią o dzisiejszym, niesamowitym zainteresowaniu ze strony naukowców z całego świata. Dodatkowo zostanie zaprezentowana i omówiona metoda jego otrzymywania, w której upatruje się największe nadzieje na 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 (metaliczny czy półprzewodnikowy).

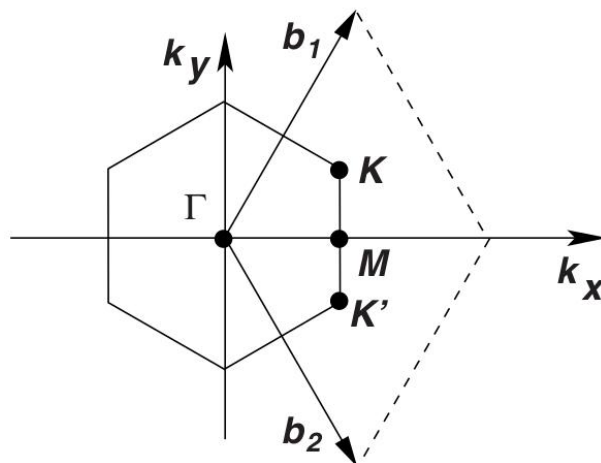
Jako wynik takiej budowy sieci grafenu, jest on bardzo wytrzymały. Teoretycznie 100 razy bardziej wytrzymały niż stal o takiej samej grubości. Mimo wszystko jest on też bardzo lekki. Istnieje bardzo obrazowe porównanie obu tych właściwości. Gdyby wytworzyć grafenowy hamak o powierzchni 1 m^2 , to taki 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 razy mniej niż waga arkusza papieru o tej samej powierzchni.

1.2 Własności elektronowe

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.

1.2.1 Struktura pasmowa

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

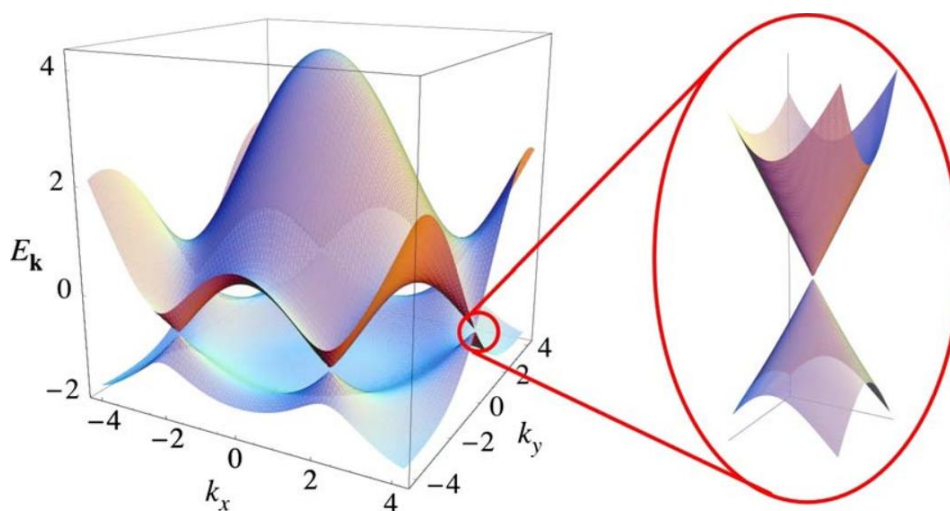


Rysunek 1.2: Sieć odwrotna grafenu

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 wywodzić 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:

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

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



Rysunek 1.3: Struktura pasmowa grafenu

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. Ze wzoru 1.1 wynika też, że jeżeli energia t' jest różna od zera, wtedy pasmo przewodnictwa i walencyjne są asymetryczne. Dodatkowo zaznaczony został obszar w pobliżu punktu K.

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 się w poprzez rozwinięcie w szereg i ograniczenie się do pierwszego wyrazu liniowego:

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

Gdzie $\vec{k} = \vec{K} + \vec{q}$ i jednocześnie $|\vec{q}| \ll |\vec{K}|$. v_F Jest to tak zwana prędkość Fermiego i wynosi $v_F = \frac{3ta}{2}$, a co do wartości $v_F \approx 10^6 \frac{m}{s}$. Taki wynik jest bardzo różny od typowej zależności dla materiałów stosowanych w elektronice, ponieważ zazwyczaj zależność energii jest funkcją kwadratową wektora falowego. Liniowa zależność świadczy o występowaniu cząstek bez masowych, zwanych bez masowymi fermionami Diraca. Taka zależność została potwierdzona eksperymentalnie. Takie kwazicząstki są bardziej podobne do fotonów niż do elektronów. To właśnie ta właściwość nośników występujących w grafenie stanowi o jego niespotykanych pośród innych materiałów właściwościach.

1.2.2 Ruchliwość

Dodatkowo bezmasowość nośników stanowi o bardzo wysokich ruchliwościach zarówno dla przewodnictwa dziuowego jak i elektronowego, co ważne nawet w temperaturach pokojowych. Jest to powszechnie uważane za największą zaletę tego materiału.

Ruchliwości z zakresu $10\,000 - 15\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ są typowe dla grafenu eksfoliowanego na podłożu z SiO_2 .¹ Jednak teoretyczne ograniczenia dla tego typu układów zostały przewidziane na $40\,000 - 70\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$.²

Co więcej przy założeniu braku defektów struktury i rozpraszaniu tylko na fononach akustycznych, przewidywana ruchliwość wynosi $200\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$.³ Co ciekawe donosi się o zmierzonej ruchliwości dla grafenu zawieszonego swobodnie wynoszącej $10^6 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$.⁴ Dla grafenu otrzymanego metodą CVD na folii niklowej i przetransferowanego na podłoże, zmierzona ruchliwość przekraczała $3\,700 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$.⁵ Donosi się też o uzyskaniu grafenu wytwarzanego metodą CVD dającego średnią ruchliwość wynoszącą $7\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$.⁶ Z punktu widzenia niniejszej pracy największe znaczenia mają wyniki otrzymywane dla grafenu CVD, ponieważ próbki tego typu były mierzone podczas pomiarów.

Te liczby robią wrażenie. Jednak należy na nie patrzeć trochę z dystansem porównując je z typowymi materiałami półprzewodnikowymi. Głównym powodem tego jest brak przerwy energetycznej. Ten problem zostanie omówiony szerzej w późniejszym podrozdziale, jednak problem został zaznaczony już tutaj.

1.2.3 Minimalna przewodność i gęstość stanów

Inną ważną właściwością jest minimalna przewodność grafenu występująca również blisko punktów Diraca. Według rozważań teoretycznych przewodność ta powinna wynosić $4 \frac{e^2}{h}$ (4 wynika z czterokrotnego zdegenerowania). Ta wartość jest poparta wynikami teoretycznymi.⁹ Należy jednak pamiętać, że grafen na podłożu SiO_2 , wykazuje pewne pofalowanie co znajduje swoje odzwierciedlenie jako pojawienie się lokalnych nośników i co z tym związane: zwiększenie tej wartości. Istnienie takiej minimalnej przewodności związane jest z funkcją gęstości stanów w grafenie. Dla uproszczenia

¹Chen, J.-H., Jang, C., Xiao, S., Ishigami, M. & Fuhrer, M. S. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO_2 . *Nature Nanotech.* 3, 206–209 (2008).

²to co wyżej i Chen, F., Xia, J., Ferry, D. K. & Tao, N. Dielectric screening enhanced performance in graphene FET. *Nano Lett.* 9, 2571–2574 (2009).

³Morozov, V. S. et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer. *Phys. Rev. Lett.* 100, 016602 (2008).

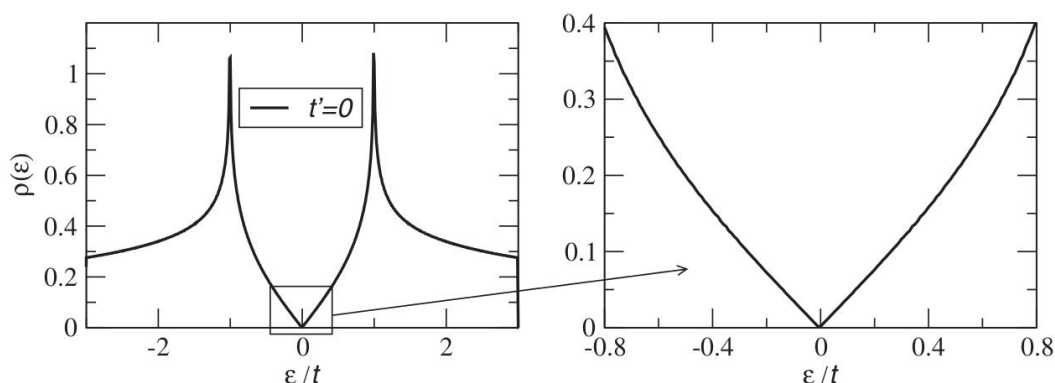
⁴Geim, A. Graphene update. *Bull. Am. Phys. Soc.* 55, abstr. J21.0004, <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2010.MAR.J21.4> (2010).

⁵Kim, K.-S. et al. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature* 457, 706–710 (2009).

⁶<http://meetings.aps.org/Meeting/MAR13/Session/B6.6>

⁹Geim, 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.

załóżmy, że pasma przewodnictwa i walencyjne są symetryczne. Wykres dla takiego założenia przedstawia obrazek 1.4.



Rysunek 1.4: Gęstość stanów

Założenie o symetrii pasm jest w pełni akceptowalne pod warunkiem ograniczenia się do punktów z bliskiego sąsiedztwa punktów Diraca w przestrzeni wektora falowego. W takim reżimie zależność energii od wektora falowego jest liniowa, zgodnie ze wzorem 1.3. Dodatkowo funkcję gęstości stanów można przedstawić przy pomocy następującego wzoru:

$$\rho(E) = \frac{2A_c}{\pi} \frac{|E|}{v_F^2} \quad (1.4)$$

Co zostało przedstawione w prawej części wykresu 1.4. Co świadczy o dobrym przybliżeniu gęstości stanów równaniem 1.4 dla dostatecznie małych energii. Wzór ten odpowiada gęstości stanów w komórce elementarnej. Uwzględniono w nim już poczwórną degenerację.

1.2.4 Przerwa energetyczna

Ze struktury pasmowej i funkcji gęstości stanów wynika, że grafen jest materiałem mającym charakter półmetal. Jest to o tyle ważne, że nie posiada on przerwy energetycznej. Przez wielu jest to uważane za główną wadę grafenu, co dyskwalifikuje go w ewentualnym zastąpieniu krzemu w dzisiejszej masowej produkcji elektroniki, która oparta jest na technologii CMOS (*ang. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*). Taki brak przerwy powoduje, że urządzenia zbudowanego z użyciem grafenu jako głównego komponentu, nie dało by się po prostu wyłączyć, a jedynie sprowadzić do stanu minimalnego przewodnictwa. Wiąże się to z dużymi stratami mocy co oczywiście z punktu widzenia ewentualnych urządzeń elektronicznych jest niedopuszczalne. Jednak trwają usilne próby mające na celu otwarcie przerwy energetycznej grafenu. Jak na razie przedstawione zostały trzy główne metody. Są nimi: wytworzenie nanowstążki⁷,

⁷ nanoribbon

zastosowanie dwuwarstw, wytworzenie silnego odkształcenia jednoosiowego.⁸

Oczywiście każda z tych metod ma swoje wady. Nanowstążki muszą być bardzo wąskie (rzędu kilkudziesięciu nanometrów), dodatkowo, co bardzo ważne, muszą mieć bardzo dobrze zdefiniowane brzegi (nie ma znaczenia czy zig-zag, czy armchair). Jest to niezwykle trudne zadanie, co ogranicza je w przemysłowym zastosowaniu. Dodatkowym minusem jest znaczne zmniejszenie ruchliwości (głównej zalety grafenu) do poziomu poniżej $200 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ dla nanowstążek o szerokości 1-10 nm,⁹ oraz $1\,500 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ dla nanowstążki o szerokości 14 nm¹⁰. Dlatego pozwalając na upodobnienie grafenu do typowych materiałów półprzewodnikowych skutkuje zniszczeniem jego największej zalety, ogromnej ruchliwości.

Jeżeli chodzi o dwuwarstwę to dużym problemem staje się to, że pasma zaczynają stawać się paraboliczne. Przypominają te z typowych półprzewodników. Dodatkowo przerwa otwarta w ten sposób jest dość wąska i wynosi ok 200-250 meV. Znowu widoczne jest pogorszenie się ruchliwości.

Ostania metoda jest chyba najciekawsza. Zakłada ona silne, globalne odkształcenie jednoosiowe materiału. Przewiduje się, że odkształcenie powinno wynosić powyżej 20%. Na pierwszy rzut oka takie rozwiązanie wydaje się być najprostsze ze wszystkich. Jednak trudno jest je wykonać w praktyce. Dodatkowo nie wiadomo jaki wpływ mają odkształcenia nieosiowe lub lokalne na przerwę w grafenie. Na razie są to rozważania teoretyczne.

Podsumowując choć jest znanych co najmniej trzy metody otwarcia przerwy energetycznej w grafenie to jednak należy założyć, że póki co nie mają one znaczenia z punktu widzenia zastosowania ich do ewentualnej technologii produkcji przyrządów elektronicznych.

1.2.5 Efekty środowiskowe

Innym problemem jest oddziaływanie grafenu z otoczeniem. Ze względu na swoje rozmiary, grafen jest podatny na wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia osiadające na jego powierzchni. Oczywiście tę wadę można przekuć w zaletę, np. wykorzystując ją do produkcji różnego rodzaju detektorów, nawet pojedynczych cząsteczek¹¹. Niemniej jednak w zastosowaniach w charakterze tranzystorów jest to dość poważna wada. Choćby z tego względu, że chcielibyśmy, aby nasze urządzenia posiadały tak stabilne parametry jak to tylko możliwe. Dodatkowo należy pamiętać, że same metody wytwarzania pozostawiają po sobie różnego rodzaju zanieczyszczenia, które w ogólności zachowują się jak domieszki. Dlatego proces produkcji grafenu praktycznie zawsze

⁸Tutaj nawstawiać odnośników z grafenowego tranzystora

⁹26,62 grafenowy tranzystor

¹⁰45, grafenowy tranzystor

¹¹odniesienie

wymaga jakiegoś dodatkowego etapu, mającego zmniejszenie liczby zanieczyszczeń. Metody te nie są też doskonałe i otrzymany nimi grafen często posiada wady strukturalne (w zasadzie nie dotyczy to tylko grafenu otrzymywanego metodą eksfoliacji).

Jedną z metod mających na celu poprawę jakości, jest tak zwane czyszczenie grafenu poprzez wygrzewanie gotowego urządzenia prądem elektrycznym o dużej gęstości, najczęściej w próżni. Taki proces zostanie opisany dokładniej w trakcie omawiania zagadnień dotyczących tranzystorów z kanałem grafenowym.

Innym problemem są zaburzenia w wysokości grafenu, spowodowane np. oddziaływaniem z podłożem. Takie fluktuacje wysokości zaburzają delikatną strukturę wiązań typu π , które jak już zostało wspomniane wcześniej mają najbardziej znaczący wpływ na własności elektronowe grafenu. Niestety nie ma na razie prostego sposobu rozwiązania tego problemu. Dodatkowo takie odkształcenia powodują również powstanie lokalnych naprężeń, co jak pokazano wcześniej może prowadzić nawet do otwarcia przerwy energetycznej.

Problematyczne są również wszelkie defekty struktury (pochodzące głównie z niedoskonałości procesu wytwarzania). Ich występowanie ma znaczący wpływ na pogorszenie się ruchliwości, poprzez zwiększenie rozpraszania na właśnie tych defektach. Dodatkowo takie defekty mogą powodować efekty tożsame z domieszkowaniem grafenu, co jest również niepożądanym efektem. Co ciekawe istnieją metody na poprawę jakości strukturalnej grafenu. Jedną z nich jest bombardowanie powierzchni grafenu atomami węgla w odpowiednich warunkach. Podczas tego procesu dochodzi do samonaprawy defektów polegających na braku atomu w węźle. Co ciekawe taka samonaprawa możliwa jest również w obecności niektórych gazów lub nawet bez żadnej "pomocy z zewnątrz" w postaci ciepła, ciśnienia, bombardowania cząstkami.¹² Jest to naprawdę ciekawa właściwość tego materiału raczej niespotykana nigdzie indziej.

Podsumowując, wszystkim tym problemom możemy przyporządkować trzy podstawowe wpływy na własności elektronowe grafenu. Są nimi: pojawienie się przerwy energetycznej, degradacja ruchliwości i wreszcie efekty, które można utożsamiać z domieszkowaniem. Problem przerwy energetycznej był już omawiany oddzielnie dlatego nie będzie omawiany teraz. Degradacja ruchliwości jest przede wszystkim następstwem wytworzenia przerwy energetycznej w grafenie, defektami lub domieszkami. Ogólnie mówiąc wszystko co może zwiększyć rozpraszanie elektronów będzie prawdopodobnie degradowało ruchliwość w grafenie. Efekty domieszkowania są o tyle uciążliwe, że mają bardzo duży wpływ na własności gotowych urządzeń. Jak już wspomniano wcześniej grafen bardzo łatwo ulega domieszkowaniu co powoduje znaczne przesunięcia poziomu Fermiego w strukturze pasmowej. Jest to o tyle istotne, że nawet w obecności normalnej atmosfery widoczny jest ten efekt. Prawdopodobnie głównym

¹²Graphene Reknits Its Holes

winowajcą jest tutaj wszechobecna wilgoć i wytwarzanie się cienkiej warstewki wody na powierzchni grafenu, co w połączeniu z ewentualnymi większymi zanieczyszczeniami prowadzi do znacznych przesunięć poziomu Fermiego. Dla idealnie czystego i idealnie strukturalnego grafenu, poziom Fermiego znajduje się dokładnie na styku pasma przewodnictwa i walencyjnego, w stożku Diraca. Zmiana tego poziomu powoduje bardzo duże zmiany w charakterystykach np. tranzystorów typu FET (*ang. Field Effect Transistor*), co jest niedopuszczalne dla przemysłu. Jest to tematyka dość obszernie porusza w niniejszej pracy, dokładniej w części eksperymentalnej.

1.2.6 Inne właściwości

Oczywiście grafen posiada wiele różnych innych właściwości czyniących go bardzo pożądanym materiałem. Do nich należą między innymi : wysoka przewodność cieplna ¹³ oraz mała absorbcja ¹⁴ światła z zakresu widzialnego. Ze względu na skończoną objętość niniejszej pracy zdecydowano o nie rozwijaniu tych właściwości jako mało istotnych z punktu widzenia zakresu materiału, o którym traktuje niniejsza praca.

1.3 Metody otrzymywania grafenu

Na dzień dzisiejszy znanych jest już kilka metod otrzymywania grafenu na potrzeby różnych zastosowań. Iskrą zapalną dla poszukiwań takich metod stało się doniesienie przez grupę naukowców z Manchesteru o opracowaniu metody otrzymywania tego materiału ¹⁵. Wcześniej panowało powszechne przekonanie, że grafen jako materiał dwuwymiarowy nie może istnieć w takiej postaci, ze względu na zbyt duże oscylacje termicznie poszczególnych atomów co w konsekwencji miałyby prowadzić do jego niestabilności. Był to przez długie lata główny powód dla, którego sprawa grafenu stanowiła tak zwaną "ziemię niczyją". Po 2004 roku kiedy okazało się, że jednak grafen jest stabilny termodynamicznie i istnieje metoda jego otrzymywania, działalność twórcza wielu naukowców zwróciła się w jego stronę. Dlatego też w stosunkowo krótkim czasie powstało wiele różnych metod otrzymywania. W niniejszym podpunkcie zaprezentowana zostaną metody najbardziej typowe i dające stosunkowo najlepsze rezultaty. Warto jednak podkreślić, że próbki otrzymane różnymi metodami różnią się od siebie.

¹³przewodność cieplna

¹⁴mała absorbcja

¹⁵Tutaj odniesienie do pierwszej pracy

1.3.1 Eksfoliacja

Jak zostało wspomniane, metoda eksfoliacji jest pierwszą metodą otrzymywania grafenu w sposób powtarzalny. Została ona przedstawiona przez grupę naukowców z Manchesteru w 2004 roku. Jako ciekawostkę można powiedzieć, że przynajmniej w początkowej fazie, prace nad nią należały do tak zwanych "piątkowych projektów". Dopiero, gdy okazało się, że faktycznie możliwe jest wytworzenie grafenu tą metodą rozpoczęto poważne prace nad nią.

Ogólnie metoda opiera się na fakcie, że grafit jest materiałem zbudowanym z gotowych, niezliczonych warstw grafenowych. Wystarczy je tylko od siebie rozseparować. Dodatkowo wiadomo, że atomy w warstwach grafenu są ze sobą silnie związane wiązaniami typu σ . Natomiast poszczególne warstwy są ze sobą związane przy pomocy dużo słabszych wiązań Van der Waalsa. Do separacji warstw wykorzystano taśmę klejącą. Po nałożeniu na taśmę fragmentu grafitu, dokonywano wielokrotnych złożeń, przy każdym złożeniu rozdzielając warstwy. Po bardzo dużej liczbie takich złożeń taśmę z warstwami umieszczano w acetonie gdzie następował rozkład taśmy i kleju. Otrzymano warstwy grafenowe zawieszone w acetonie. Kolejnym krokiem było umieszczenie ich na podłożu krzemowym, pokrytym SiO_2 o odpowiedniej grubości. Grubość tlenku ma tutaj zasadnicze znaczenie ze względu na absorpcję światła przez grafen. Dla tlenków o grubościach 10 nm i 300 nm obserwuje się maksymalny kontrast pomiędzy obszarem pokrytym grafenem i obszarem podłoża. Ten rodzaj eksfoliacji nazywany jest mokrym, ze względu na użycie rozpuszczalnika pomiędzy procesem separacji a transferu.

Po około roku metoda została ulepszona przez usunięcie etapu rozpuszczania taśmy w acetonie, a transferu dokonuje się bezpośrednio z taśmy klejącej. W tym przypadku mówi się o suchej eksfoliacji. Po procesie transferu, następuje czasochłonny etap poszukiwań pojedynczych warstw. Do tego celu używany jest mikroskop optyczny dysponujący odpowiednim powiększeniem. Powiększenie jest niezbędne ze względu na małe rozmiary otrzymywanych warstw. W tym momencie ujawnia się największa wada tej metody. Nie może być mowy o jakiegokolwiek powtarzalności. Próbkę zazwyczaj są małe, rzędu pojedynczych mikrometrów, choć donosi się o warstwach grafenu otrzymanych tą metodą rzędu milimetrów i widocznych gołym okiem na powierzchni podłoża. Drugą wadą tej metody jest cena tak pozyskiwanego materiału, z uwzględnieniem znikomej wydajności i ogromu czasu potrzebnego na zlokalizowanie odpowiedniej warstwy.

Jednak ta metoda ma niezaprzeczalną zaletę. Grafen otrzymany dzięki niej jest bardzo wysokiej jakości strukturalnej, w zasadzie najlepszej. Dzięki czemu jest bardzo pożądanym do celów naukowych. Dodatkowo do jego wytworzenia nie są potrzebne ani wyspecjalizowany sprzęt. Ze względu na prostotę metodę można stosować nawet

w warunkach domowych. Niestety wady tej metody całkowicie eliminują ją w zastosowaniach przemysłowych.

Warto wspomnieć, że sukces tej metody otworzył przed naukowcami możliwości badania również innych materiałów warstwowych np. siarczku molibdenu, lub siarczku wolframu. Oba te materiały są bardzo obiecującymi, wschodzącymi materiałami dla nanoelektroniki.

1.3.2 Epitaksja na węglu krzemu

Ta metoda w przeciwieństwie do poprzedniej wymaga już dość skomplikowanego sprzętu laboratoryjnego. Do wytwarzania grafenu tą metodą potrzeba bardzo wysokich próżni, rzędu 10^{-6} torra, przy jednocześnie zapewnieniu bardzo wysokich temperatur, rzędu 1 100 °C. Takie warunki są potrzebne ze względu na mechanizm tworzenia grafenu, jakim w tym przypadku jest, odparowywanie atomów krzemu z podłoża. Nadmiarowe atomy węgla organizują się wtedy do postaci grafenu. Dodatkowo ważne jest czy grafen będzie tworzony po stronie węglowej SiC czy po stronie krzemowej. Ma to duże znaczenie dla przyszłych właściwości grafenu.

Pomimo znacznego skomplikowania tej metody w porównaniu do poprzedniej. Ta metoda zapewnia grafen o dużych powierzchniach, porównywalnych do powierzchni podłoża na którym został przeprowadzony proces. Jest to zatem pierwszy warunek umożliwiający wdrożenie jej do przemysłowej produkcji grafenu.

Grafen otrzymany tą metodą jest dobrej jakości zarówno pod względem strukturalnym jak również pod względem parametrów elektronowych. Jak przykład wystarczy podać, że pierwsza wizualizacja struktury pasmowej w szczególności stożków Diraca została przeprowadzona po raz pierwszy w grafenie otrzymanym tą metodą. W materiale otrzymanym tą metodą obserwowane są bardzo wysokie ruchliwości, utrzymujące się nawet w wysokich temperaturach. Przez bardzo wysokie rozumie się tutaj bardzo zbliżone do tych otrzymywanych dla grafenu eksfoliowanego na powierzchni SiO_2 .

Kolejną zaletą jest to, że tak otrzymany grafen można poddawać procesom technologicznym, stosowanym już w przemyśle. Niestety wady tej metody z punktu widzenia zastosowań są znaczne. Przede wszystkim wysokie koszty sprzętu, wysokie ceny samych podłoży SiC, sprawiają, że grafen otrzymywany tą metodą jest po prostu drogi. Do tego dochodzą problemy z jego transferem na inne podłoża. Nie jest on niemożliwy jednak jest skomplikowany i znacznie pogarsza właściwości grafenu.¹⁶ Jak już wspomniano proces jest dość skomplikowany i zależy od bardzo wielu czynników. Jednak przy masowej produkcji nie ma to większego znaczenia, ponieważ po opanowaniu tego procesu i przy odpowiednim finansowaniu można przejść do używania tej metody na

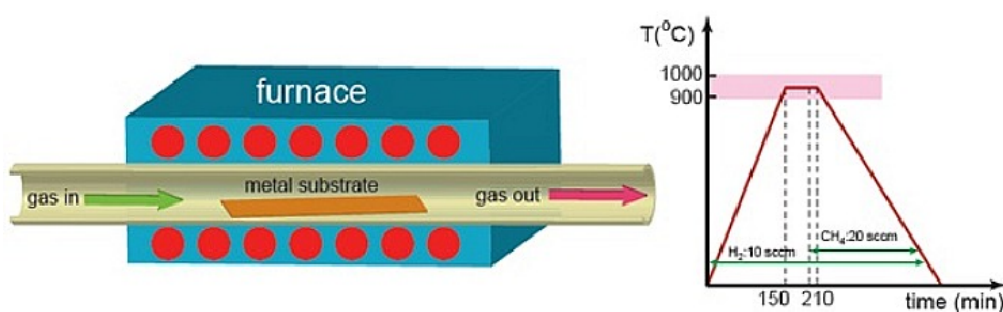
¹⁶Transfer of graphene layers grown on SiC wafers to other substrates and their integration into field effect transistors

skalę przemysłową. Oczywiście metoda ta jest w dalszym ciągu rozwijana i ulepszana.

1.3.3 Metoda CVD

Pomimo, iż niniejsza metoda wydaje się być prosta, przynajmniej z pojęciowego punktu widzenia. To wcielenie jej w życie jest już sprawą dalece bardziej skomplikowaną. Mówiąc najprościej CVD polega na osadzeniu reagentów w postaci gazowej na powierzchni próbki. Jest to osiągane przy pomocy gazów pomocniczych będących nośnikami molekuł mających być osadzonymi na powierzchni próbki. Takie gazy o temperaturze zazwyczaj pokojowej, wprowadzane są do reaktora, osadzają się na powierzchni próbki. Należy dodać, że w reaktorze skład atmosfery jest dobrany w odpowiedni sposób. Całość jest ogrzewana. Gdy reagenty dotrą do powierzchni próbki zaczyna się reakcja syntezy, która tworzy cienką warstwę. Reagenty osadzają się na zasadzie kondensacji z formy gazowej. Następnie zużyte gazy są odpompowywane z reaktora. Temperatura próbki odgrywa bardzo istotną rolę, ponieważ to ona decyduje o charakterze zachodzących reakcji. Dlatego dokładana kontrola i stabilność temperatury jest w zasadzie podstawowym kryterium.

Sam proces osiadania cząsteczek gazu na próbce jest zazwyczaj bardzo powolny. Co skutkuje bardzo powolnym wzrostem warstw, typową prędkością wzrostu jest mikrometr na godzinę. Zaletą tak powolnego wzrostu jest możliwość precyzyjnej kontroli grubości warstw jak również dobra jakość otrzymanego materiału. Dlatego też metoda ta znajduje zastosowania również w produkcji materiałów półprzewodnikowych, często dla optoelektroniki. Istnieją dwie typowe odmiany tej metody różniące się wartością próżni w komorze reaktora. Próżnia jest bardzo pożądanym zjawiskiem podczas reakcji syntezy ze względu na ograniczenie prawdopodobieństwa zachodzenia innych, niepożądanych reakcji. Objawia się to czystością tak powstałej warstw i jednocześnie zapewnia równomierny wzrost na powierzchni całej próbki.

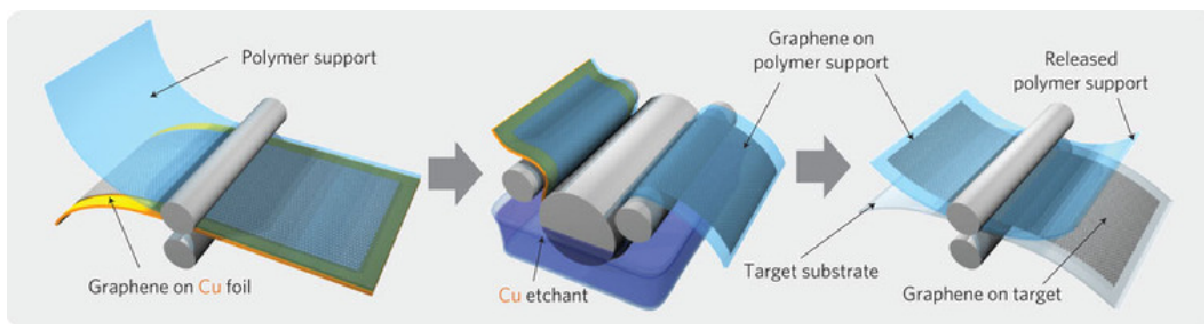


Rysunek 1.5: Reaktor

Wadą tej metody jest konieczność stosowania bardzo toksycznych i niebezpiecznych gazów jako prekursorów dla przyszłych warstw. Często są one dość niestabilne

(jednak muszą być na tyle stabilne by w ogóle dało się je wprowadzić do komory reaktora). Dodatkowo zmieszane gazy wychodzące muszą być utylizowane w odpowiedni sposób, ponieważ zazwyczaj są one niebezpieczne dla życia i zdrowia ludzi. Często obecny wodór dodatkowo stwarza niebezpieczeństwo wybuchu.

Ograniczmy się jednak teraz tylko do grafenowego kontekstu tej metody. Ten proces składa się z dwóch podstawowych etapów. W pierwszym uzyskuje się prekursor do syntezy w reaktorze. Zazwyczaj taki prekursor powstaje w procesie pirolizy, co doprowadza do pojawienia się wolnych atomów węgla. Następnie tak otrzymane atomy wprowadzone zostają do komory reaktora, gdzie zachodzi drugi etap. Podczas tej fazy następuje synteza grafenu na powierzchni próbki. Problematiczne staje się już samo wprowadzenie takich rozseparowanych atomów węgla, ponieważ bardzo łatwo tworzą one węgiel amorficzny (sadzę). Innym problem jest sam proces pirolizy, który wymaga bardzo dużych ilości ciepła, co wymaga stosowania metalicznych katalizatorów dla zmniejszenia potrzebnych temperatur.



Rysunek 1.6: Proces transferu

Proces syntezy również wymaga dużych ilości ciepła, czyli wysokich temperatur. Bez użycia katalizatorów temperatury muszą sięgać 2 500 °C. Dlatego użycie katalizatorów staje się wręcz niezbędne. Dzięki katalizatorom udaje się obniżyć niezbędną temperaturę w komorze reaktora do poziomu około 1 000 °C. Jednak jego wprowadzenie sprawia, że w komorze mamy dodatkowy czynnik mogący reagować z innymi, przez co mogą zachodzić reakcje niepożądane z punktu widzenia wytwarzania grafenu. Przykładem może być wnikanie atomów węgla w głąb niklu (typowy pierwiastek podłoża używany do syntezy grafenu), efektywnie zmniejszając ilość dostępnych wolnych atomów węgla. Dlatego też bardzo ważne jest, aby móc dokładnie kontrolować warunki panujące na każdym z etapów procesu. Dzięki temu możliwe jest wytwarzanie grafenu o zadowalających właściwościach.

Mając wytworzony grafen wysokiej jakości na miedzianej folii, lub na podłożu z niklu, powstaje potrzeba transferu materiału na inne, często nieprzewodzące podłoże. To jest proces mający szczególne znaczenie dla struktury grafenu, ponieważ podczas tej procedury jest on bardzo podatny na wszelkiego rodzaju uszkodzenia. Co skutkuje obniżeniem jego jakości. Dodatkowo opracowanie niezawodnej, dobrej metody

przeprowadzenia transferu jest o tyle trudne, że nie do końca poznano charakter oddziaływania grafenu z podłożem na, którym został wyhodowany.

Typową metodą transferu, zwłaszcza dużych płyt grafenu jest użycie polimerów. Po wyjęciu z reaktora, próbkę pokrywa się polimerem (PMMA). Mającym na celu stworzenie rusztowania dla grafenu. Następnie metaliczne podłoże zostaje wytrawione. Polimer wraz z grafenem zostaje nałożone na nasze docelowe podłoże. Ostatnim etapem jest zmycie polimeru. Ta metoda daje bardzo dobre efekty. To znaczy, nie prowadzi do zniszczeń w strukturze krystalicznej grafenu. Dlatego też, jest dość powszechnie stosowana i w niej upatruje się przemysłowe zastosowania.

Metoda CVD daje dodatkowo inne korzyści. Twierdzi się, że możliwe jest takie przygotowanie podłoża katalitycznego (najczęściej folia miedziana), aby wytworzony materiał od razu był domieszkowany, lub od razu posiadał przerwę energetyczną. Takie postępowanie bardzo ułatwiłoby produkcję, ponieważ skróciło by ewentualne operacje dokonywane na już gotowym materiale.

To wszystko sprawia, że metoda CVD jest bardzo obiecującą metodą w ewentualnych zastosowaniach przemysłowych.

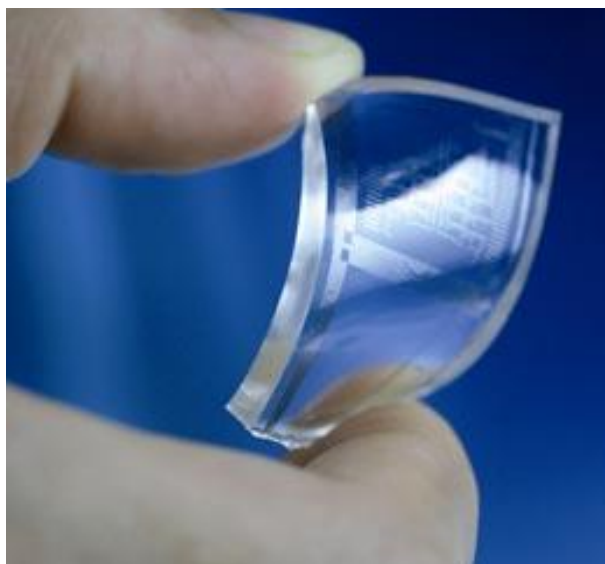
1.4 Zastosowania

Potencjalnych zastosowań dla grafenu jest bardzo wiele. Niektóre z nich są nieoczywiste na pierwszy rzut oka. Poniżej znajduje się kilka zastosowań, w których upatruje się całkiem spore nadzieje. Każde z zastosowań wykorzystuje jakąś niezwykłą właściwość lub kilka z nich. Jako, że grafen wykazuje niską absorpcję światła w zakresie widzialnym, został on zaproponowany jako przeźroczysta elektroda. Zarówno do ogniw fotowoltaicznych jak i dla wyświetlaczy ciekłokrystalicznych. Dodatkowym atutem grafenu jest jego zdolność do wytrzymywania dużych gęstości prądu. Niektórzy spekulują nawet, że mógłby zostać użyty jako medium przesyłowe.

Z dobrymi własnościami przewodzenia elektrycznego w parze idzie doskonałe przewodnictwo cieplne. Znane są już gotowe zastosowania grafenu do odprowadzania ciepła z urządzeń elektronicznych.

Bardzo ciekawym wykorzystaniem własności mechanicznych jest membrana grafenowa, wprawiana w ruch przy pomocy mikroskopu sił atomowych. Dzięki zmianom w częstotliwości rezonansowej możliwe było wykrywanie osadzania się pojedynczych cząsteczek. W ten sposób otrzymano bardzo czułą wagę, lub mówiąc inaczej detektor pojedynczych cząstek.

Dość egzotycznym zastosowaniem tlenku grafenu (GO), jest stworzenie membrany, zdolnej do przepuszczania tylko cząsteczek wody. Dzięki temu można destylować alkohol w temperaturze pokojowej. Co zostało pokazane na przykładzie kiedy



Rysunek 1.7: Przeźroczysta elektroda wykonana z grafenu

to zwiększono zawartość procentową wódki. Takie membrany mogłyby zrewolucjonizować rynek biopaliw, drastycznie obniżając koszty produkcji, oszczędzając przy tym dużo energii. Tę samą właściwość można też wykorzystać w drugą stronę, zbierając tylko przechodzącą wodę. Taki mechanizm pozwoliłby odsalać wodę znacząco zmniejszając koszty i poprawiając jakość tak otrzymanej wody.

Całą gałąź zastosowań grafenu stanowi nanoelektronika. Najprostszym możliwym zastosowaniem jest wykorzystanie tego materiału do zastosowań przesyłowych ciepła i prądu przy jednoczesnej wysokiej skali miniaturyzacji. Bardziej zaawansowanym zastosowaniem są tranzystory polowe z kanałem grafenowym. Z zasady działania te urządzenia najbardziej zbliżone są do tranzystorów polowych z izolowaną bramką (*ang. MOSFET, Metal- Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*). Ten rodzaj urządzeń zostanie omówiony szczegółowo w następnym rozdziale, ponieważ tego typu urządzenia stały się podstawowym sposobem badawczym w tej pracy.

Na podstawie takich tranzystorów powstają też różnego rodzaju czujniki. Zasada działania opiera się na wspomnianej pozornej wadzie, jaką jest zmiana własności elektronowych, przy osadzeniu się czegoś na powierzchni. Tutaj z kolei problemem jest za mała zmiana tych własności, by móc zareagować np. na pojedynczą molekułę. Dlatego by zwiększyć ten efekt powierzchnia grafenu jest funkcjonalizowana. Na przykład specjalnie dobranymi polimerami, które zachowują sprawiają, że koncentracja takich molekuł gazowych się znacznie zwiększa, przez co możliwe jest wykrycie zmian charakterystyk elektrycznych. Takie mechanizmy są wykorzystywane przy okazji innych materiałów, jednak grafen pozwala uzyskiwać dużo lepszą czułość.¹⁷ Mechanizm działania takich czujników nie ogranicza się tylko do wykrywania gazów. Istnieją już czujniki

¹⁷Schedin, F. et al. (2007). "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene". *Nature Mater* 6 (9): 652–655. Bibcode:2007NatMa...6..652S. doi:10.1038/nmat1967. PMID 17660825.

biomedyczne, w których powierzchnia grafenu została sfunkcjonalizowana przeciwciałami, co dało możliwość wykrywania np. bakterii ¹⁸. Idąc dalej tym tropem, postuluje się możliwość odczytywania sekwencji DNA tanim i szybkim sposobem przy zastosowaniu grafenu. ¹⁹. Tutaj pomysł polega na wytworzeniu nanoporu, przez który przepuszczane był by łańcuch DNA a zmiany w parametrach elektrycznych były by przetwarzane na sekwencję DNA w czasie rzeczywistym.

¹⁸<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl802412n>

¹⁹<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl802412n>

ROZDZIAŁ 2

TRANZYSTOR GRAFENOWY

Jak to działo się wiele razy w historii pojedyncze odkrycie, rzeczy z pozoru błażej daje początek nowej idei, która staje się nowym kołem zamachowym dalszego rozwoju. Być może znajdujemy się w przededniu takiego odkrycia, porównywalnego do wynalezienia tranzystora. Mowa tutaj o grafenie, który jest bardzo poważnym kandydatem na materiał w erze elektroniki post-krzemowej. Jako dowód tego stwierdzenia wystarczy wspomnieć, że grafen znajduje się na liście „Międzynarodowej mapie technologii półprzewodnikowej”¹

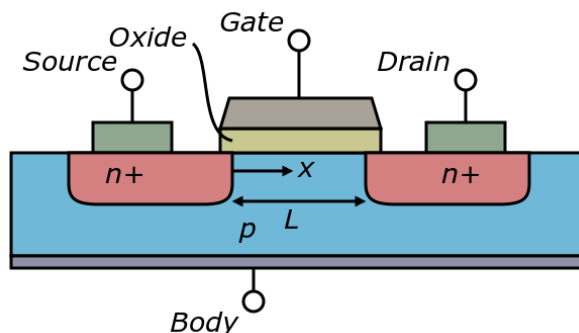
Dzięki wzmożonej pracy wielu zespołów naukowych badających grafen. Już dzisiaj można mówić o realnej możliwości zastosowania tego materiału w procesie produkcji urządzeń elektronicznych. Mimo tak szybkiego rozwoju tej tematyki nie można w sposób jednoznaczny rozstrzygnąć panującej dyskusji, czy jest to na pewno wykonalne.

W niniejszym rozdziale zostanie przedstawiona idea działania tranzystora FET. Prawdopodobnie najlepszej koncepcji urządzenia elektronicznego w dzisiejszym świecie. Następnie zostanie przedstawiona koncepcja zastosowania grafenu przy produkcji tego typu urządzenia. Wraz z omówieniem podstaw fizycznych jego działania, modelami teoretycznymi, zostaną również przedstawione najważniejsze parametry z punktu widzenia inżynierii stosowania takich urządzeń. Modele teoretyczne posłużą w następnym rozdziale do ich konfrontacji z danymi eksperymentalnymi. Co zostanie opisane w następnym rozdziale. Na koniec zostanie przedstawiony proces wytwarzania takiego tranzystora.

¹The International Technology Roadmap for Semiconductors <http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2009.htm> (Semiconductor Industry Association, 2009).

2.1 Tranzystor FET

Nazwa tego typu urządzenia pochodzi od angielskiego *Field Effect Transistor*. Ze względu na największe podobieństwo konstrukcji tranzystorów grafenowych do tranzystorów polowych typu MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor FET*), stanie się on podstawowym punktem odniesienia. Budowa takiego urządzenia została przedstawiona na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1: Przekrój ukazujący wewnętrzną budowę tranzystora typu MOSFET

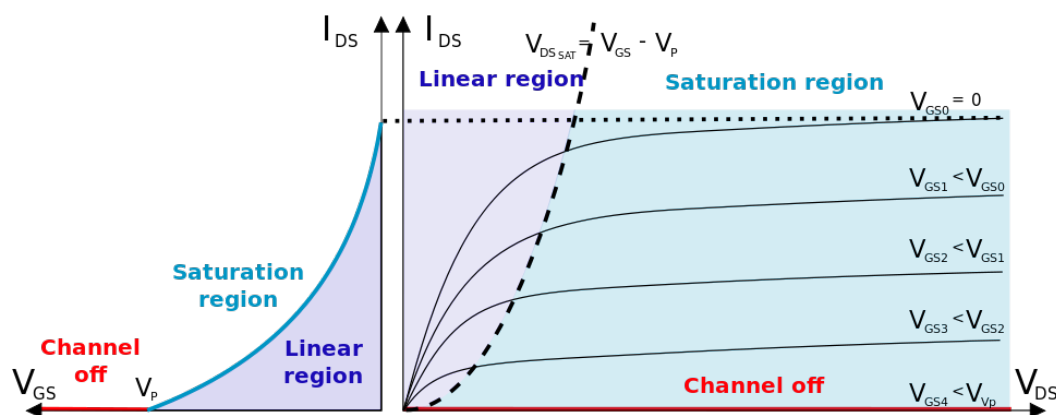
Jak widzimy na podłożu typu p zostały wytworzone obszary typu n, stanowiące źródło i dren. Zazwyczaj obszary te powstają na drodze implantacji jonów lub dyfuzji atomów domieszek do podłoża. Pomiedzy tymi obszarami w efekcie zjawiska polowego powstaje kanał. Kanał tworzy się, gdy pomiędzy bramką a podłożem zostanie przyłożone napięcie. Dla tranzystora typu n-kanalowego, napięcie musi być dodatnie. Po przyłożeniu dodatniego napięcia, elektrony z podłoża zaczynają gromadzić się pod bramką. W ten sposób jako nośniki mniejszościowe sprawiają, że obszar ten staje się obszarem wyróżnionym pod względem zwiększenia jego przewodności. Dzięki temu przy przyłożonym napięciu pomiędzy drenem a źródłem zaczyna płynąć prąd.

Taki tranzystor może znajdować się w 3 obszarach pracy. Wyłączony, brak wytworzonego kanału, duża oporność pomiędzy drenem i źródłem. Obszar liniowej pracy kiedy to prąd drenu zależy w przybliżeniu liniowo od napięcia dren-źródło. Wreszcie obszar nasycenia, gdzie prąd źródło-dren słabo zależy od zmian napięcia pomiędzy nimi. Wszystkie te sytuacje przedstawia rysunek 2.2.

Matematycznie można to opisać równaniem:

$$I_{DS}(V_G, V_{DS}) = \mu C_{ox} \frac{W}{L} [(V_G - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}] \quad (2.1)$$

Wyróżniamy dwa podstawowe typy charakterystyk elektrycznych tranzystorów FET. Pierwszym jest charakterystyka przejściowa, którą otrzymuje się gdy prąd drenu otrzymuje się jako funkcję napięcia bramkowego, przy stałym napięciu źródło-dren. Drugim typem jest tak zwana charakterystyka wyjściowa będąca funkcją prądu drenu do napięcia dren-źródło, przy stałym napięciu bramkowym.



Rysunek 2.2: Zależność prądu płynącego przez tranzystor

Mierząc te charakterystyki i porównując je ze wzorem 2.1, można wyznaczyć ruchliwość badanego tranzystora, μ . Znając inne parametry występujące we wzorze, gdzie: L -długość kanału, W -szerokość kanału, C_{ox} -powierzchniowa gęstość pojemności pomiędzy kanałem a bramką, V_G -napięcie bramkowe, V_{DS} -napięcie dren-źródło, V_T -tak zwane napięcie progowe. Pomiary tych charakterystyk stały się podstawą do wyciągnięcia wniosków o właściwościach transportowych grafenu, użytego w roli kanału.

Dzisiaj w świecie inżynierii elektronicznej istnieją dwie podstawowe grupy określające zastosowanie danego tranzystora. Zastosowania w układach logicznych lub w układach radiowych. W zasadzie można powiedzieć, że albo do zastosowań cyfrowych albo do zastosowań analogowych.

Relatywnie większą łatwość wprowadzania nowych technologicznie materiałów obserwuje się w segmencie analogowym. Wynika, to głównie z tego względu, że wydajność urządzeń cyfrowych najbardziej zależy od najgorszych egzemplarzy tranzystorów zintegrowanych w układzie logicznym. Podczas, gdy w przypadku pojedynczo produkowanych tranzystorów do zastosowań analogowych, te z nich, które za bardzo odbiegają parametrami od norm mogą zostać niedopuszczone do sprzedaży. Co odbywa się bez wpływu dla reszty sprzedawanych egzemplarzy tranzystorów. To samo tyczy się zintegrowanych układów scalonych. Jako znacznie prostsze są mniej narażone na ewentualne odchyłki parametrów pojedynczego tranzystora.

Jednak pomimo różnic, obie te gałęzie dążą do wspólnych celów. Zmniejszenia kosztów produkcji pojedynczego tranzystora. Polepszenia jego właściwości. Głównie dla tranzystorów przeznaczonych do zastosowań cyfrowych działaniem mającym na celu zaspokojenie obu tych wymagań przez wiele lat było sukcesywne zmniejszanie pojedynczego tranzystora. Dzięki temu stawały się one szybsze. Zajmując mniej miejsca na podłożu oszczędzały drogi krzem.

Dzięki tym zabiegom złożoność układów cyfrowych mogła się podwajać co 18 mie-

się. Ta zależność jest nazywana „prawem Moora”. Jednocześnie takie układy stały się tańsze.

Ze zmniejszaniem się pojedynczego tranzystora rosły wymagania co do procesu technologicznego, w którym je produkowano. Dzisiejsze fabryki układów scalonych stały się niesłychanie kosztownymi przedsięwzięciami (kosztującymi miliardy dolarów). Właśnie te linie produkcyjne są jednym z powodów całkowitego opanowania przez krzem technologii produkcji układów cyfrowych, ponieważ budowa nowej fabryki pochłonie więcej pieniędzy niż modernizacja obecnej. Należy pamiętać, że postępem rządzi ekonomia.

To rozwiązanie zaczęło zawodzić, kiedy zaczęto dochodzić rozmiarami tranzystora do granic możliwości. Wtedy stało się jasne, że niezbędne będzie opracowanie całkowicie nowej technologii wytwarzania lepszych tranzystorów.

Wspomniana technologia układów cyfrowych opiera się na komplementarnych tranzystorach CMOS (*Complementary Metal- Oxide-Semiconductor*). Podstawowym budulcem bramek logicznych jest para tranzystorów MOS z kanałami n i p. Oba mogą znajdować w dwóch stanach: włączenia i wyłączenia. Najwięcej energii pobierane jest, gdy chcemy zmienić ten stan. Idea polega na takim projektowaniu układów logicznych by poszczególne bramki logiczne składały się z kombinacji tranzystorów n i p kanałowych, która zapewnia brak przepływu dużych prądów w stanie ustalonym. Często najbardziej znaczącym prądem w stanie ustalonym jest suma prądów upływności bramek. Są one niezbędne do poprawnej polaryzacji bramki. Z tego powodu bardzo pożądaną właściwością tych tranzystorów jest duży stosunek prądu włączenia do prądu wyłączenia, z warunkiem minimalizacji prądu wyłączenia. Typowymi wartościami są tutaj stosunki wł/wył wynoszące 10^4 – 10^7 ². W typowych konstrukcjach poszczególnych FET-ów wymaga to posiadania wystarczająco szerokiej przerwy energetycznej najlepiej więcej niż 0,4 eV. Drugą ważną właściwością jest posiadanie dokładnie takiego samego napięcia przełączania. Dopiero te dwa warunki są w stanie zapewnić dobrego kandydata na następcę dla dzisiaj stosowanych materiałów.

Sytuacja w dziedzinie zastosowań analogowych, ze szczególnym wskazaniem zastosowań radiowych, wygląda z goła inaczej. Tutaj sama miniaturyzacja tranzystora nie jest najważniejsza, bo ważniejsze są jego właściwości, a same zintegrowane układy analogowe są znacznie bardziej proste niż cyfrowe. Dodatkowo badania nad wieloma technologiami były i są wspierane przez agencje wojskowe. Dzięki temu produkty wysokiej jakości, ale będące drogie znajdują swoje zastosowania. Dzięki temu ten segment rynku jest znacznie bardziej otwarty na nowe technologie. Jako przykłady można wspomnieć tutaj np o tranzystorach HEMT, opartych na materiałach III-IV; urządzeniach opartych na technologii arsenku galu GaAs, lub fosforku indu InP.

W zastosowaniach analogowych nie wymaga się od tranzystora posiadania stanu

²gr. tranz. ref 2

całkowitego wyłączenia. Zazwyczaj i tak w większości zastosowań tranzystory te pracują w jakimś punkcie pracy, który wymusza stały przepływ prądu. Tutaj dużo ważniejszym parametrem jest z kolei liniowość i wysoka częstotliwość odcięcia. W przypadku grafenu co zostanie pokazane poniżej warunek liniowości jest bardzo dobrze spełniony. Tak samo jak spełniony jest ten o wysokiej częstotliwości odcięcia. Donosi się o tranzystorach grafenowych o specjalnej budowie, gdzie rolę bramki pełni nanoprzewód, dla których częstotliwość odcięcia zawierała się w przedziale 100–300 GHz ³.

Podsumowując, z powodów tutaj przedstawionych wynika, że technologia grafenu ma większą szansę zaistnieć w wysokoczęstotliwościowych zastosowaniach analogowych. Dodatkowe argumenty potwierdzające tą tezę znajdują się w kolejnej części, mówiącej o czysto fizycznych aspektach stosowania grafenu do produkcji urządzeń elektronicznych.

2.2 Tranzystor FET z kanałem grafenowym

2.2.1 Podstawy fizyczne działania

W szerokich paskach grafenowych może istnieć wiele pojedynczych kanałów przewodnictwa. Transport przez te kanały jest proporcjonalnie zmniejszany względem długości całego paska. Szerokość natomiast ma wpływ na wzrost liczby dostępnych kanałów. Zakładając, że mówimy tutaj o sytuacji, w której znajdujemy się w pobliżu punktów Diraca. Można napisać, że:

$$G \sim \frac{e^2}{h} \frac{W}{L} \quad (2.2)$$

Gdzie W-szerokość paska grafenowego, L-jego długość. Wzór 2.2, pochodzi z ⁴. Ta zależność prowadzi do wniosku, że przewodność skaluje się tutaj tak jak w przypadku funkcji przewodnictwa w metalach dyfuzyjnych.

Zależność koncentracji od napięcia bramkowego jest liniowa, a koncentracja wiąże się również liniowo z przewodnictwem⁵. Co zostało zaprezentowane w poprzednim rozdziale. Z tego wynika, że zależność przewodności jest liniową funkcją napięcia bramkowego co zostało pokazane empirycznie np. przez ⁶. Jedynym miejscem, gdzie nie jest to prawdą jest okolica występowania minima przewodnictwa. Jest to związane, ze zmianą typów nośników.

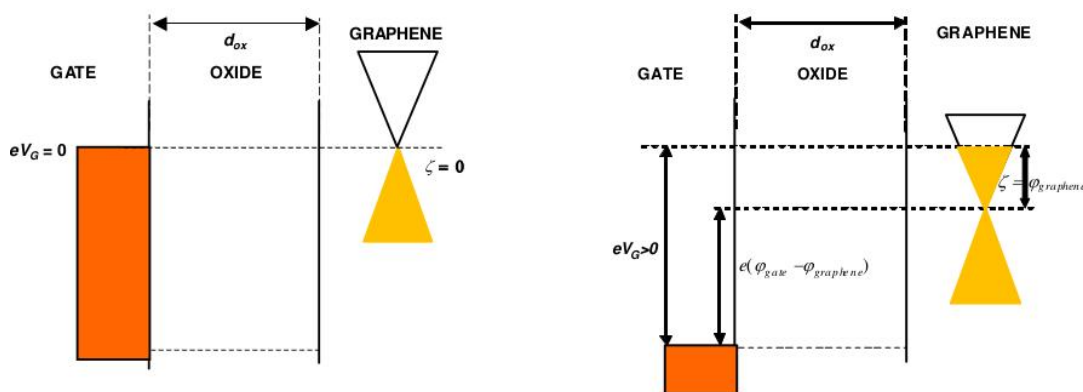
Tranzystory grafenowe mają bardzo interesujące i niespotykane charakterystyki przejściowe. Przykład takiej charakterystyki znajduje się na rysunku 2.4. Typ nośni-

³High-speed graphene transistors with a self-aligned nanowire gate

⁴<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0603315>

⁵<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/71/1318/>

⁶<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1180777/>



Rysunek 2.3: Zasada działania tranzystora grafenowego

ków jak również ich koncentracja zależą od napięcia pomiędzy bramką a kanałem. Dla dużych napięć ujemnych obserwujemy akumulację dziur w kanale i w tym obszarze charakterystyka świadczy, o kanale typu p. Duże napięcia dodatnie na bramce prowadzą do akumulacji elektronów w kanale i dla tego obszaru charakterystyka wskazuje na kanał typu n.

Taki mechanizm powoduje powstanie dwóch niezależnych obszarów w charakterystyce przejściowej, które rozdzielone są punktem minimalnego przewodnictwa, punktem Diraca. Położenie tego punktu na charakterystyce zależy od wielu czynników. Po pierwsze od różnicy pracy wyjścia materiału bramki i grafenu, co można zobaczyć na obrazku 2.3, czyli od konstrukcji samego urządzenia. Bardzo ważnym czynnikiem jest również wszelkie domieszkowanie kanału. Wpływ na domieszkowanie mają defekty strukturalne jak również wszelkie zanieczyszczenia, powstałe w skutek ekspozycji na powietrze, lub domieszkowanie celowe. Innym ważnym czynnikiem jest też koncentracja i typ ładunków na interfejsach dolnych, i górnych (np. dla urządzenia typu top-gate).

Jak widać na rysunku 2.3, zmieniając napięcie bramkowe zmieniamy położenie poziomu Fermiego w kanale. Zmieniając ten poziom sterujemy gęstością stanów poszczególnych nośników. Dlatego zwiększając napięcie obserwujemy wzrost koncentracji elektronów w kanale i spadek koncentracji dziur. Wtedy kanał staje się typu n. Natomiast, gdy zmniejszamy napięcie bramkowe, obniżamy ten poziom a wraz z nim koncentrację elektronów i tym samym zwiększamy koncentrację dziur. Takie zachowanie wynika wprost ze struktury pasmowej grafenu, a zwłaszcza z obszaru styku pasm przewodnictwa i walencyjnego, tak zwanych stożków Diraca, o których była mowa w poprzednim rozdziale.

Ważne jest by zauważyć iż gęstość stanów jest zależna w sposób liniowy od napięcia bramkowego, co znowu wynika ze struktury pasmowej tego materiału. Gęstość stanów ma bezpośredni wpływ na koncentrację, a od koncentracji w sposób również liniowy zależy przewodność kanału. Podsumowując napięcie bramkowe steruje w sposób liniowy przewodnością kanału. Dodatkowo polaryzacja napięcia ma wpływ na typ

akumulowanego ładunku w kanale i tym samym na jego typ (n lub p).

2.2.2 Najważniejsze właściwości

Ruchliwość Jest to najczęściej podawana zaleta grafenu. Zwłaszcza zdolność do jej zachowania nawet w temperaturach pokojowych, co zostało omówione w poprzednim rozdziale, wraz z podaniem jej wartości dla poszczególnych przypadków grafenu na różnych podłożach. Wysokie wartości osiąganych ruchliwości w tym materiale robią duże nadzieje na znalezienie dla tego materiału odpowiedniego zastosowania.

Problemem jest tutaj to, że tak duże wartości są osiągane dla dużych próbek grafenu, które z kolei nie posiadają przerwy energetycznej. Jest to znaczna wada, co zostało wykazane w poprzednim podpunkcie.

Przerwa energetyczna Jak zostało wspomniane przerwa energetyczna jest bardzo pożądaną własnością. Powody zostały przedstawione na początku tego rozdziału. Istnieją metody takiej inżynierii grafenu, zdolne wytworzyć przerwę energetyczną w grafenie. Jednak skutkuje to bardzo znacznym zmniejszeniem ruchliwości, czyli głównej zalety tego materiału. Mówiąc bardziej ilościowo, dla metody stosowania tak zwanych nanowstążek grafenowych ruchliwości wynoszą około $200 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$, co jest wielkością o trzy rzędy większości mniejszą niż w grafenie pochodzącym z eksfoliacji, o dużo większej powierzchni.⁷

Dlatego podsumowując najlepiej było by opracować taką technologię, która wymaga wysokiej ruchliwości i nie wymaga posiadania przerwy energetycznej. Zamiast przystosowywać ten materiał do znanych nam obecnie technologii. Dlatego w dalszym ciągu ewentualne zastosowania w przemyśle pozostają kwestią otwartą.

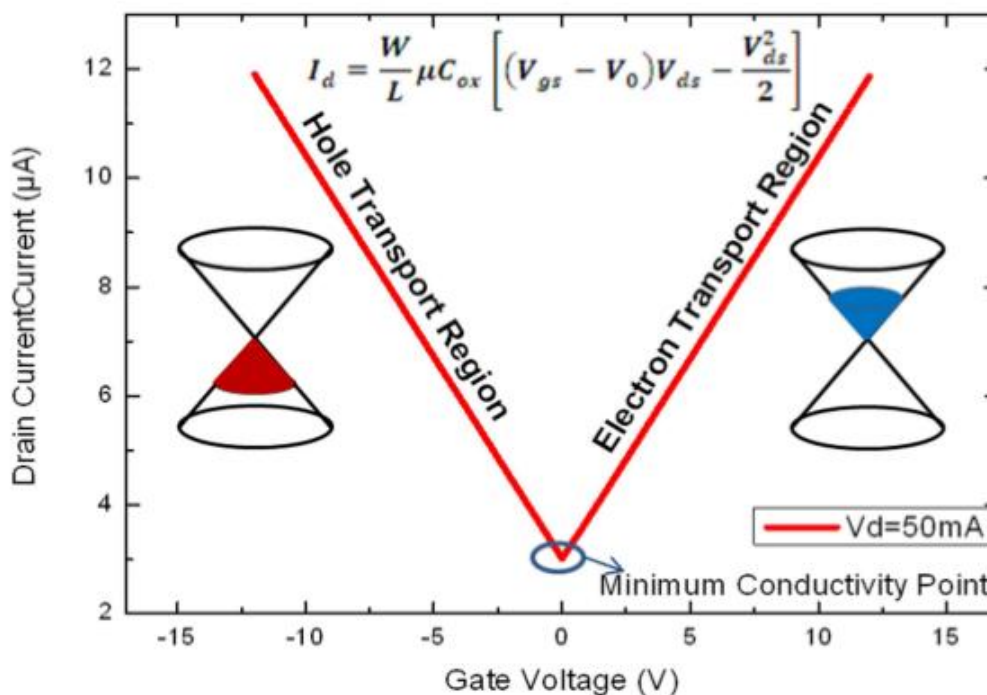
Dwuwymiarowość Powołując się na teorię skalowania tranzystorów typu MOSFET⁸, dostatecznie cienki obszar kanału pozwoliłby na skalowanie długości bramki do bardzo małych rozmiarów. Co z kolei zapewniłoby wzrost częstotliwości odcięcia i poprawiło parametry takiego tranzystora w porównaniu do innych. Dwuwymiarowa postać grafenu zapewnia najmniejszą grubość kanału jaka w ogóle jest możliwa do osiągnięcia. Dlatego wedle tej teorii tranzystory grafenowe powinny się łatwiej skalować od tych opartych na materiałach trójwymiarowych. Oczywiście należy zauważyć, iż ta teoria dotyczy tylko półprzewodników, a grafen jest półmetalem i taki kanał nie posiada przerwy energetycznej. Jednak nanowstążki wykazują taką przerwę zatem dla nich ta teoria powinna być prawdziwa. Jednak jak już wspomniano w przypadku nanowstążek obserwowane ruchliwości są znacznie mniejsze niż dla grafenu masywnego. Być

⁷tutaj odnośniki z 1 rozdziału

⁸Robert Dennard 1974

może okazać się, że dzięki możliwości skalowania takich nanowstążkowych tranzystorów wzrośnie znacznie szybkość ich przełączania. Co w połączeniu z możliwością ich wyłączenia stanie się podstawą do stosowania ich w układach logicznych, gdzie te właściwości są najbardziej decydujące, a ruchliwość ma znaczenie drugorzędne.

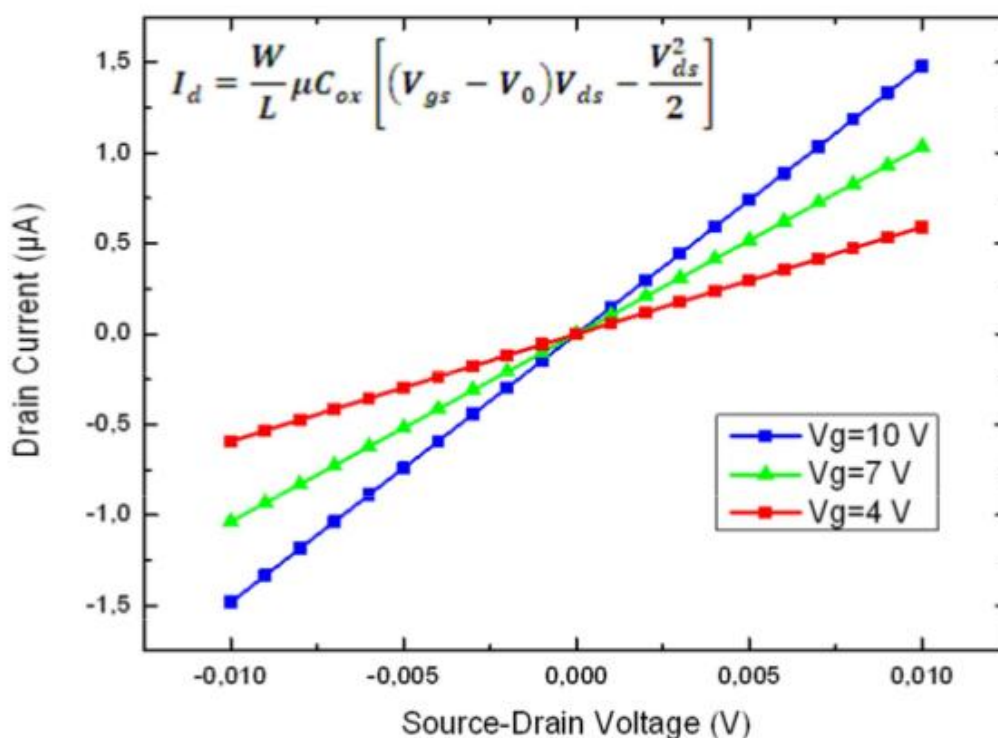
2.2.3 Omówienie charakterystyk elektrycznych



Rysunek 2.4: Wygląd typowej charakterystyki przejściowej tranzystora GFET

Pierwszą i mającą w zasadzie największe znaczenie dla wyznaczania najważniejszych parametrów charakteryzujących tranzystory jest charakterystyka przejściowa. Charakterystyka przejściowa zbierana jest, gdy mierzony jest prąd płynący przez kanał, przy stałym napięciu dren-źródło w funkcji napięcia bramkowego. Często prąd zamieniany jest na wielkość zapewniającą bardziej obiektywny wgląd w faktyczne zmiany właściwości materiału jaką jest przewodność, ewentualnie rezystywność. Taka typowa charakterystyka została przedstawiona na obrazku 2.4. Jak widać, charakterystyka jest liniowo zależna od napięcia bramkowego, oprócz obszaru w okolicy minimum przewodnictwa.

Drugim typem charakterystyki jest charakterystyka wyjściowa. Pomiarów tej charakterystyki dokonuje się poprzez Ustawienie stałego napięcia bramkowego i wyznaczeniu prądu dren-źródło w funkcji napięcia dren-źródło. Typowy wygląd charakterystyki dla grafenu został przedstawiony na rysunku 2.5. Tutaj również często zamienia się prąd



Rysunek 2.5: Wygląd typowej charakterystyki wyjściowej tranzystora GFET

na przewodność lub rezystywność. Ten rodzaj charakterystyki zazwyczaj ma mniejsze znaczenie dla charakteryzacji.

2.2.4 Proponowane modele transportu

W niniejszej pracy zaprezentowano kilka najczęściej proponowanych podejść do wyznaczania parametrów transportowych urządzeń grafenowych. Głównym parametrem wyznaczanym dla tych urządzeń jest ruchliwość. Istnieją co najmniej trzy metody jej wyznaczania.

Model Drudego Pierwszym z modeli transportu jest model Drudego. Model Drudego zazwyczaj znajduje zastosowanie w opisie metali. Grafen jest półmetalem dlatego istnieją przesłanki do jego stosowania. Model ten opiera się na kinetycznej teorii gazów, gdzie zamiast gazu mamy do czynienia z tak zwanym gazem elektronowym. Elektrony tak jak molekuły gazu poruszają się chaotycznie zderzając się z jonami sieci krystalicznej. Po przyłożeniu pola elektrycznego powstaje kolektywny ruch w kierunku działania pola, który jest nałożony na te chaotyczne drgania termiczne. W ogólności można zapisać:

$$\tilde{J} = q n_{\text{ind}} \mu_{\text{Drude}} \tilde{E} \quad (2.3)$$

Z tego równania na gęstość prądu można po prostych przekształceniach otrzymać równanie używane do określenia ruchliwości dla próbek grafenowych:

$$\sigma = C_{ox} V_G \mu_{Drude} \quad (2.4)$$

Gdzie C_{ox} -gęstość powierzchniowa pojemności, opisana wzorem:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r}{d_{ox}} \quad (2.5)$$

Dzięki temu funkcja przewodności σ , zależy tylko od jednego parametru w sposób liniowy. To znaczy od napięcia bramkowego V_G . Mając takie opis matematyczny i dysponując zmierzonymi charakterystykami przejściowymi, wyznaczenia ruchliwości dokonuje się dopasowywując zmierzoną przewodność do tej oczekiwanej. Parametrem dopasowywanym jest oczywiście ruchliwość, ponieważ inne zmienne występujące w równaniu 2.4, są albo znane.

Dla tego modelu donosi się o wysokich ruchliwościach przy wysokiej koncentracji nośników.⁹

Model stałej ruchliwości Model zakładający stałą ruchliwość nośników w grafenie, niezależnej od koncentracji, zaproponowany został przez¹⁰. Dzięki takim założeniom można zapisać wzór na opór elektryczny próbki jako :

$$R_{całkowite} = 2R_{kontakt} + \frac{L}{W} \frac{1}{\mu \sqrt{e^2 n_o + C_{ox}^2 (V_G - V_{Dirac}^2)}} \quad (2.6)$$

W przypadku równania 2.6 również dopasowuje się to równanie do danych eksperymentalnych. Parametrami dopasowania są w tym przypadku: $R_{kontakt}$ -będące opornością kontaktów, stałą ruchliwość μ i koncentrację nośników n_o .

Model ruchliwości Halla Ta metoda wyznaczania ruchliwości jest również często stosowana, choć wymaga ona dodatkowego sprzętu laboratoryjnego. Przedstawiając w sposób najprostszy polega ona na wyznaczaniu zależności oporu przy stałych napięciach bramkowych w obecności zmiennych pól magnetycznych.

Ta metoda nie znalazła zastosowania w niniejszej pracy. Dlatego nie zostanie ona opisana dokładniej.

Metoda techniczna (to jest chyba do zmiany!) Istnieje jeszcze metoda wykorzystująca ogólny model tranzystora FET. Opisany równaniem 2.1, gdzie po prostych

⁹1,17 model tr. gr.

¹⁰S. Adam, E. H. Hwang, and S. Das Sarma, Physica E 40, 1022 (2008).

przekształceniach i założeniu, że znajdujemy się w liniowym obszarze charakterystyki przejściowej, można napisać:

$$\mu_{FE} = \frac{L}{W} \frac{g_m}{C_{ox} V_{DS}} \quad (2.7)$$

$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_G} \right|_{V_{DS}=\text{const}} \quad (2.8)$$

Ogromną zaletą tej metody jest jej uniwersalność i możliwość porównywania tranzystorów wykonanych nawet w zupełnie innej technologii i przy użyciu innych materiałów.

Nie jest ona niestety pozbawiona wad. Duży wpływ na wartość otrzymanej ruchliwości ma wybór części charakterystyki. Dlatego istnieje tutaj sporo miejsca do nadużyć, lub popełniania błędów. Jednak w przypadku urządzeń grafenowych, nie ma to aż takiego znaczenia, ponieważ te charakterystyki są liniowe w szerokim zakresie. Dlatego również ta metoda jest dobra do oszacowania ruchliwości.

2.3 Najnowsze technologie tranzystorów grafenowych

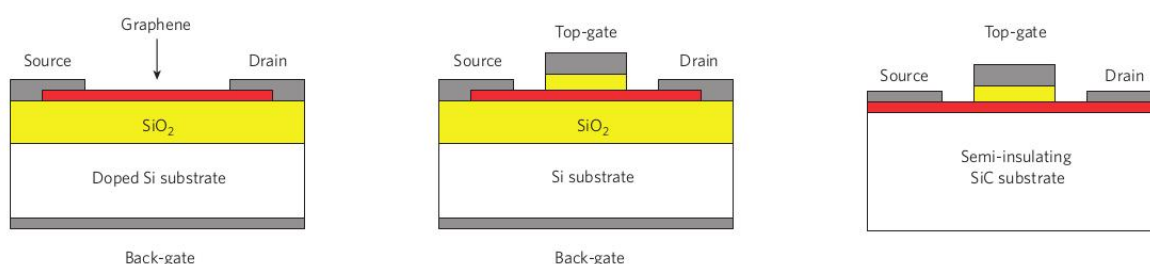
Typowe schematy budowy tranzystorów grafenowych zostały przedstawiona na rysunku 2.6. Widoczne są tutaj dwa najczęściej stosowane podłoża, to znaczy podłoże krzemowe i podłoże węgla krzemu. Jak widzimy najmniej skomplikowanym schematem jest pierwszy od lewej, czyli tak zwany bottom-gate. Gdzie rolę bramki pełni podłoże krzemowe domieszkowane w odpowiedni sposób. Tranzystory tego typu pojawiły się już na samym początku badania grafenu w roku 2004. Jednak ich zaleta, to znaczy prostota, znacznie ogranicza ich stosowanie w jakimś praktycznym zastosowaniu. Wystarczy tutaj tylko wspomnieć, że duża wielkość bramki i jej duża pojemność powodują, niską częstotliwość odcięcia. Niemniej taki typ budowy wciąż jest stosowany w badaniach transportowych właśnie ze względu na swoją prostotę i to, że pozwala obserwować topografię grafenu np. przy pomocy mikroskopii AFM co jest niezbędne w niektórych badaniach.

Drugim typem budowy jest top-gate, gdzie na kanale nałożony jest materiał dielektryczny, na którym została napyłony elektryczny kontakt bramki. Taka budowa tranzystora jest znacznie bardziej zbliżona do dzisiaj stosowanych co pozwala na łatwiejsze porównywanie takich tranzystorów z obecnie produkowanymi. Zwłaszcza w kwestii długości bramki w odniesieniu do częstotliwości odcięcia. Często pozostawia się dodatkowo dolną bramkę służącą porównaniu osiągnięć dla każdej z nich, lub badaniu wpływowi dielektryka na własności transportowe. Tylina bramka okazuje się być również niezwykle przydatna w czasie procesu produkcji. Pozwala stwierdzić, czy kontakty drenu i źródła są odpowiednio nałożone, czy tranzystor reaguje już na napięcie bramkowe. Problemem tego typu tranzystorów bywa wpływ nałożenia dielektryka na zmniejsz-

szenie się ruchliwości. Minimalizacja tego problemu jest wciąż obiektem badań.

Ostatnim najczęściej spotykana koncepcja tranzystora jest oparta o grafen otrzymany z węgliku krzemu. Ważne jest, że węglik krzemu w ogólności jest przewodzący, dlatego należy stosować jego wersję półprzewodzącą. Zwiększa to koszt produkcji jednak pozwala w ogóle takim tranzystorom działać. Z tego też względu jedyną bramką jest bramka górna. Znowu ten rodzaj tranzystora jest podobny do obecnie wytwarzanych i w tym przypadku nie odbiega zbyt swoją koncepcją od poprzedniego. Tutaj również istnieje problem pogorszenia parametrów kanału po nałożeniu dielektryka bramkowego.

Największe nadzieje wiązane są ze strukturami top-gate. Przede wszystkim ze względu na większe możliwości miniaturyzacji i lepszej optymalizacji bramki. Co ma wpływ na szybkość tranzystora. Częstotliwość odcięcia wiąże się z długością bramki jak L^{-1} , gdzie L jest długością bramki. Ruchliwość również wpływa na szybkość, zwiększając ją. Typowe MOSFET oparte na krzemie wykazują ruchliwości rzędu $100 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$, struktury typu pHEMT oparte o arsenek galu $6\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$, natomiast te oparte o fosforek indu $10\,000 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ ¹¹. Przy coraz mniejszych długościach bramki ruchliwość przestaje mieć duże znaczenie na szybkość tranzystora i większy wpływ zaczynają mieć efekty związane z impedancjami pasożytniczymi i efekty krótkiego kanału. Co prawda tranzystory grafenowe są wciąż gorsze niż konwencjonalne tranzystory pracujące w wysokich częstotliwościach. To jednak już wyprzedziły swoimi parametrami te oparte o krzem i powoli zbliżają się do struktur opartych o arsenek galu. Donosi się o tranzystorze opartym na nanowstążce grafenu, pokrytej dielektrykiem HfO_2 (dielektryk o wysokiej stałej dielektrycznej), który w temperaturze pokojowej osiągnął stosunek prądów wł/wył wynoszącą 70 i niesamowitą transkonduktancję wynoszącą $3,2 \text{ mS}\mu\text{m}$ (co jest lepszym wynikiem niż najlepsze tranzystory krzemowe MOSFET i HEMT oparte na arsenku galu).¹²



Rysunek 2.6: Spotykane struktury tranzystorów grafenowych

¹¹Chodzi tutaj o tak zwane ruchliwości efektu polowego dla gotowych już urządzeń

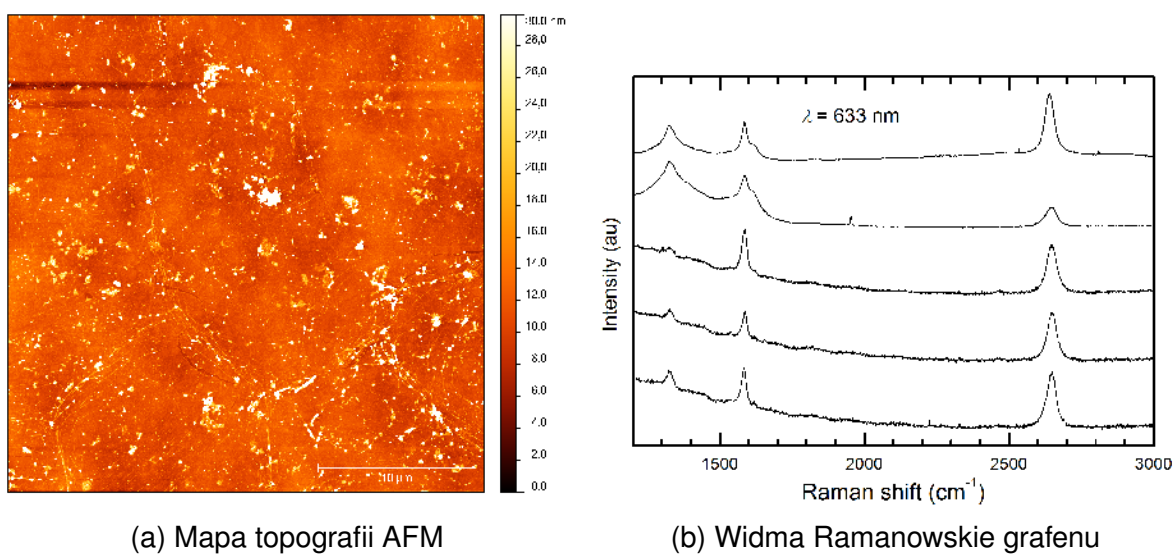
¹²ref 82 z tr. gr. review

2.4 Proces produkcji tranzystorów z kanałem grafenowym

W tej części zostanie opisany proces otrzymywania tranzystorów z transferowanego grafenu CVD, na podłożu krzemowe, o strukturze bottom-gate. Ze względu na to, iż dokładny opis wszystkich etapów takiej produkcji byłby bardzo obszerny, zostanie on tutaj przedstawiony w lakonicznej formie. Będzie on dotyczył metodologii otrzymania tranzystorów, które zostały poddane charakteryzacji, a jej wyniki posłużyły jako dane eksperymentalne dla poniższej pracy dyplomowej.

2.4.1 Produkcja grafenu i transfer

Ten etap w zasadzie został już opisany przy okazji opisu samej metody CVD. Z tego też względu należy w zasadzie tylko dodać, że grubość SiO_2 wynosiła 300 nm. Próbki zostały zakupione od firmy Graphenea. Próbki przed dalszymi etapami produkcji zostały poddane charakteryzacji. Polegała ona na wykonaniu skanu topografii mikroskopem sił atomowym i spektroskopii Ramana.

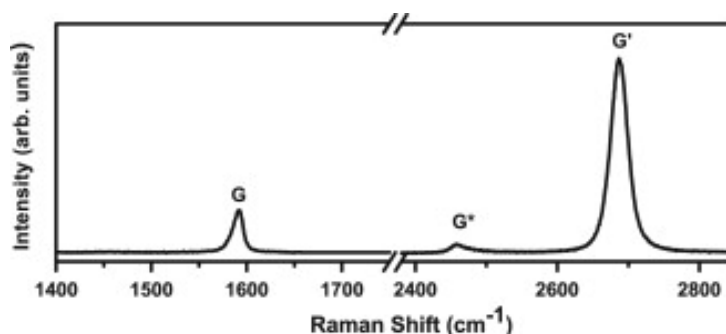


(a) Mapa topografii AFM

(b) Widma Ramanowskie grafenu

Mapa topografii wskazuje na wysoką czystość próbki, jako, że wysokość na próbce waha się jedynie w granicach 0–30 nm. Otrzymane widma Ramana wskazują na dobrą jakość strukturalną grafenu. Porównując je z wykresem pochodzącym z literatury staje się jasne, że mamy do czynienia z jedną warstwą grafenową¹³, rysunek 2.7.

¹³Raman spectroscopy in graphene, Physics Reports, vol. 473, no. 5–6, pp. 51–87, Apr. 2009.



Rysunek 2.7: Wykres przykładowego widma Ramana

2.4.2 Nałożenie kontaktów drenu i źródła

Kolejnym krokiem w procesie produkcji było nałożenie kontaktów elektrycznych dla drenu i źródła. W celu optymalizacji struktury postanowiono wykorzystać jeden wspólny kontakt dla wszystkich tranzystorów, stanowiący źródło.

Proces wytwarzania kontaktów rozpoczyna się od nałożenia przy pomocy spin-coatera rezystu. Następnie rezyst zostaje naświetlony przy pomocy wcześniej zaprojektowanej maski. W taki sposób by po wywołaniu wytworzyły się zagłębienia, stanowiące formy dla przyszłych elektrod. Następnym krokiem jest napylenie na całą powierzchnię próbki metalu, tworzącego elektrody. Do usunięcia zbędnych obszarów z nałożonego metalu używa się metody lift-off. Polega ona na zanurzeniu próbki w rozpuszczalniku pozostałego rezystu i poddaniu próbki działaniu ultradźwięków. Dzięki temu otrzymujemy pożądaną wzór elektrod na powierzchni próbki.

Oczywiście nie jest to metoda idealna ze względu chociażby na wytworzenie się "uszuń" krawędziach elektrod. Jest to o tyle niebezpieczne, że taka wysoka cienka krawędź może opaść i wytworzyć zwarcie, zwłaszcza, gdy elektrody znajdują się w bardzo bliskich odległościach. Innym często spotykanym problemem jest gdy mimo wypłukania rezystu spod warstwy metalu ten dalej się utrzymuje. Zazwyczaj kończy się to zniszczeniem próbki ze względu na niemożność usunięcia tego nadmiaru metalu.

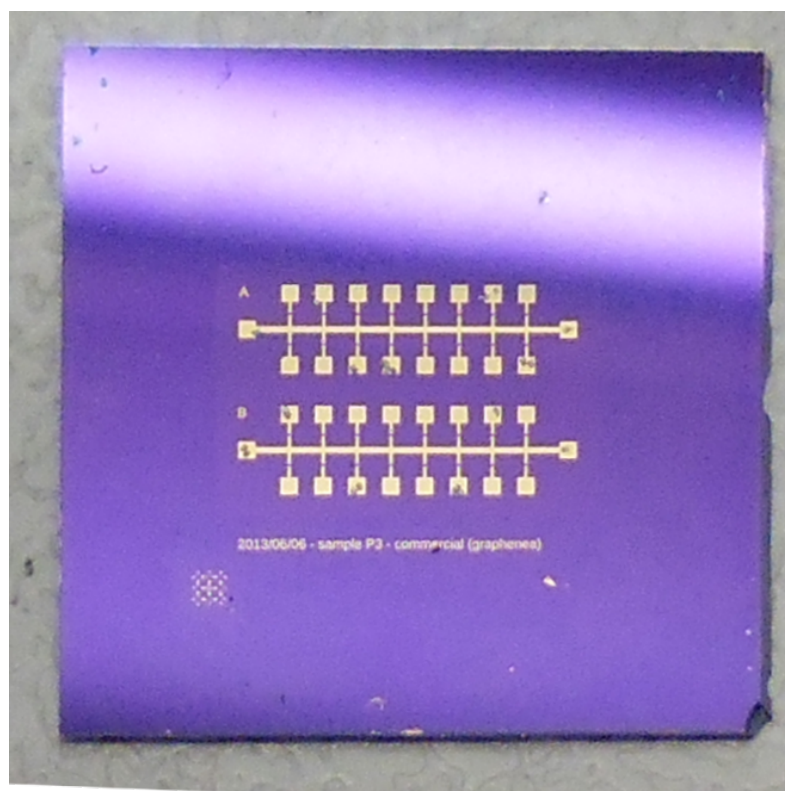
Największą zaletą tej metody jest to, że nie wykorzystuje ona żadnych agresywnych chemikaliów do trawienia. Ma to istotny wpływ na utrzymanie jakości badanego grafenu.

2.4.3 Wytwarzanie kanału

W kolejnym kroku należy usunąć nadmiar grafenu, który teraz pokrywa przestrzeń pomiędzy wszystkimi elektrodami. Osiąga się to poprzez wykonanie nałożenie rezystu i wywołaniu go w taki sposób by wytworzył warstwę ochronną nad miejscami, w których pozostać ma grafen.

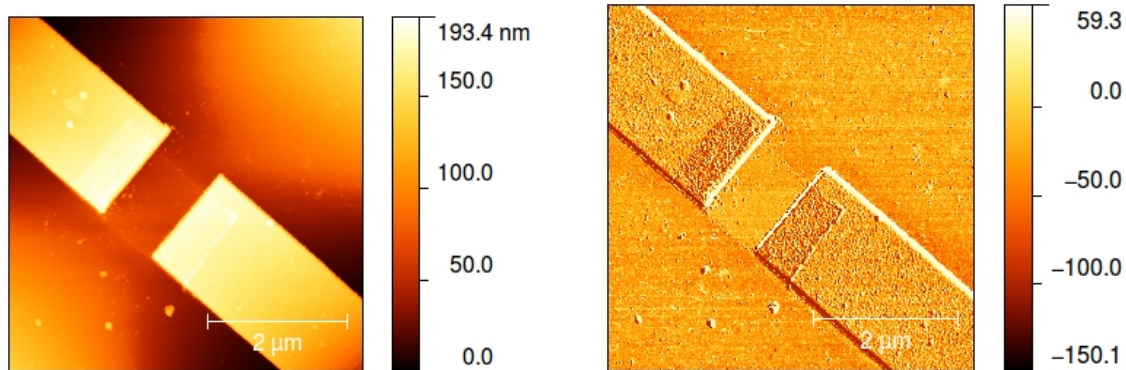
Tak przygotowaną próbkę poddaje się trawieniu plazmowemu, otrzymując w zasa-

dzie gotową już próbkę. Wystarczy teraz tylko usunąć resztki ochroniającego rezystu i próbka jest już gotowa.



Rysunek 2.8: Gotowa próbka

Zdjęcie przedstawione na rysunku 2.8 przedstawia taką gotową strukturę. W lewym dolnym rogu widoczne są markery niezbędne przy naświetlaniu kolejnych masek. Widoczna jest też topografia próbki. Jak widać wszystkie tranzystory zostały wytworzone wzdłuż jednej masywnej elektrody. Ta elektroda stanowi umownie źródło. Dreny kolejnych tranzystorów są połączone ze źródłem poprzez kanały grafenowe. Przykładowy skan takiego pojedynczego kanału przedstawiony został na obrazkach 2.9a i 2.9b.



(a) Topografii AFM jednego z kanałów

(b) Skan fazowy AFM

Pomiary AFM wykonane zostały w trybie kontaktu przerywanego. Dzięki temu możliwe było uzyskanie, oprócz skanu topograficznego, skanu fazowego. Skan topograficzny dostarcza informacji bezpośrednio o wysokości na próbce. Skan fazowy zapewnia informacje związaną z kontrastem materiałowym. Niestety ze względu na skomplikowaną naturę oddziaływań igły z danym materiałem dokładana analiza ilościowa jest bardzo utrudniona. Dlatego postanowiono ograniczyć się do stwierdzenia, że na skanie widoczne są trzy materiały. Podłoże z SiO_2 , złote elektrody i kanał grafenowy. Co więcej skany AFM pozwoliły określić realne wymiary kanałów badanych tranzystorów niezbędne do wyznaczania parametrów transportowych. Zostanie to dokładniej opisane w następnym rozdziale.

ROZDZIAŁ 3

POMIARY ELEKTRYCZNE TRANZYSTORÓW

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

ROZDZIAŁ 4

PODSUMOWANIE

_____ SPIS TABLIC

1.1	Sieć atomowa grafenu	2
1.2	Sieć odwrotna grafenu	3
1.3	Struktura pasmowa grafenu	4
1.4	Gęstość stanów	6
1.5	Reaktor	12
1.6	Proces transferu	13
1.7	Przeźroczysta elektroda wykonana z grafenu	15
2.1	Przekrój ukazujący wewnętrzną budowę tranzystora typu MOSFET . . .	18
2.2	Zależność prądu płynącego przez tranzystor	19
2.3	Zasada działania tranzystora grafenowego	22
2.4	Wygląd typowej charakterystyki przejściowej tranzystora GFET	24
2.5	Wygląd typowej charakterystyki wyjściowej tranzystora GFET	25
2.6	Spotykane struktury tranzystorów grafenowych	28
2.7	Wykres przykładowego widma Ramana	30
2.8	Gotowa próbka	31