

Streszczenie

Węgiel jest pierwiastkiem, który tworzy materiały wykazujące niezwykle właściwości. Dla przykładu, diament należy do najtwardszych materiałów na świecie, podczas gdy grafit jest miękki i może być używany jako smar. To proste porównanie obrazuje szerokie spektrum cech, które czynią węgiel wysoce interesującym pod kątem licznych jego zastosowań. Różne formy węgla (odmiany alotropowe) od wielu lat są przedmiotem intensywnych badań podstawowych we wszystkich dziedzinach nauk przyrodniczych. Mimo iż badania cienkich lub nawet pojedynczych warstw grafitu były prowadzone na długo przed rokiem 2004, to dopiero od tego roku grafen znalazł się w centrum zainteresowania naukowców z całego świata.

Grafen jest pojedynczą warstwą atomów węgla złożoną z pierścieni heksagonalnych z wiązaniami węglowymi o hybrydyzacji sp^2 . Teoretyczne rozważania dotyczące właściwości grafenu były prowadzone już przed ponad sześćdziesięciu laty. Pomimo iż nie było jasne, czy grafen można syntetyzować, stanowił on podstawę teoretyczną dla wszystkich znanych materiałów grafitowych.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie różnych węglowych nanostruktur z punktu widzenia ich zastosowania w detektorach lub sensorach. Intencją przeprowadzonych badań było zaprojektowanie, wytworzenie i charakteryzacja struktur, z naciskiem na ich właściwości podstawowe i efekty fizyczne, raczej niż optymalizacja dobrze znanych rozwiązań. Badaniom poddano trzy różne typy struktur oparte na epitaksjalnym grafenie wyhodowanym na węglu krzemu (SiC) oraz grafenie naturalnie występującym na powierzchni grafitu. Grafen uważany jest za obiecującego kandydata w sferze zastosowań dotyczących czujników z uwagi na jego doskonałe właściwości elektryczne, dwuwymiarowy charakter oraz oczekiwaną kompatybilność z cząsteczkami organicznymi. Główną ideą łączącą wszystkie trzy podejścia jest możliwość wywierania wpływu na rozkład nośników ładunku w grafenie poprzez różne czynniki zewnętrzne (pole magnetyczne, pole elektryczne, otoczenie chemiczne).

W pierwszej grupie struktur użyto grafenu epitaksjalnego, wyhodowanego na SiC w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) w Warszawie. Korzystając z litografii optycznej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego wytworzono mikrometrowych rozmiarów struktury hallowskie. Metalowe kontakty łączące grafen z doprowadzeniami zewnętrznymi zostały zabezpieczone przy użyciu specjalnej żywicy, tak aby próbki mogły wejść w kontakt z roztworem. Korzystając z przezroczystości podłoża SiC w widzialnym zakresie długości fali możliwe było wykonanie pomiarów spektroskopii ramanowskiej oraz jednocześnie monitorowanie oporności grafenu. Przykładanie napięcia między roztworem a grafenem umożliwiło zmianę koncentracji nośników w grafenie.

Roztwór może być tutaj postrzegany jako odpowiednik dielektryka w zwykłych tranzystorach polowych. Zmiana w koncentracji nośników pozwoliła na zbadanie sprzężenia elektron-fonon i umożliwiła identyfikację nowego, dotychczas niezaobserwowanego efektu rezonansowego sprzężenia elektron-fonon z fononem G dla dwuwarstwowej struktury (bilayer) epitaksjalnego grafenu w temperaturze pokojowej. Obserwacja cech związanych ze sprzężeniem rezonansowym umożliwiła otrzymanie geometrycznej pojemności układu z uwzględnieniem pojemności kwantowej grafenu. Stwierdzono, że przykładanie większych napięć do bramki inicjowało elektrochemiczne reakcje z grafenem, które mogły być monitorowane przy użyciu spektroskopii ramanowskiej. W efekcie zachodzących reakcji w widmie ramanowskim pojawiły się charakterystyczne dla wiązań CH piki, co zinterpretowano jako przejaw chemisorpcji wodoru na grafenie. Wykazano, że proces chemisorpcji na grafenie jest częściowo odwracalny.

Drugi typ badanych struktur stanowiły również warstwy epitaksjalne grafenu. Przed przystąpieniem do procesu hodowania tych warstw przeprowadzono implantację jonami azotu, podczas pobytu na Australijskim Uniwersytecie Narodowym w Canberze. Zaimplantowany azot spowodował powstanie warstwy przewodzącej typu n wewnątrz półzolejającego podłoża SiC. Została ona użyta jako bramka. Skuteczność tej bramki została sprawdzona przy zastosowaniu pomiarów magneto-transportowych w niskich temperaturach. Uzyskane wyniki potwierdziły efekt bramkowania.

Kolejny przebadany system to płatki węglowe naturalnie występujące na powierzchni grafitu, wykazujące zachowanie podobne do grafenu. Podczas pobytu w Narodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych w Grenoble zlokalizowano i zbadano szereg płatków przy zastosowaniu spektroskopii magneto-ramanowskiej. Płatki identyfikowano poprzez mapowanie powierzchni nastawione na charakterystyczne sygnały związane z rezonansem magneto-fononowym w stałym polu magnetycznym o $B = 10$ T. Zmieniając w sposób ciągły pole magnetyczne w zakresie $B = 0 - 14$ T zarejestrowano ewolucję rezonansu magneto-fononowego dla różnych płatków grafenowych. Wykonane pomiary pozwoliły na identyfikację nowych, dotychczas niezaobserwowanych rezonansów pomiędzy wzbudzeniami elektronowymi i fononowymi. Zbadano i przeanalizowano wiele płatków, co umożliwiło uzyskanie danych statystycznych dotyczących prędkości Fermiego. Zaobserwowano, że w przypadku gdy wartość prędkości była niższa niż dla swobodnych płatków grafenu, pojawiała się silna asymetria w kształcie piku dla przejść między poziomami Landaua. Uzyskane wyniki pokazują, że spektroskopia poziomów Landaua oparta na efekcie Ramana stanowi skuteczne narzędzie, które może być używane do badania oddziaływań pomiędzy grafenem a podłożem.

Rezultaty otrzymane w ramach badań trzech typów struktur są osadzone w kontekście zastosowań dotyczących czujników i zostały omówione w konkluzjach niniejszej pracy.