

## Слайд 2

Углеродное покрытие – это структура, состоящая из комбинаций алмазных ( $sp^3$ ) и графитоподобных ( $sp^2$ ) связей. Такие покрытия обычно являются аморфными, что говорит о наличии ближнего порядка и отсутствии дальнего атомарного порядка в структуре покрытия. Как известно, углерод может образовывать множество аллотропных форм из-за его валентности и имеет три гибридизации:  $sp^3$ ,  $sp^2$  и  $sp^1$  (рис.1.1). Наиболее известные аллотропные формы углерода: алмаз, графит и аморфный углерод (рис.1.2). Алмаз имеет кубическую кристаллическую структуру с четырехкратно соединенными  $sp^3$  связями (рис.1.2 а). Графит имеет гексагональную решетку с  $sp^2$  связями в двумерной плоскости структуры, которые соединены между собой слабыми силами (рис.1.2 б). Аморфный углерод может иметь любую комбинацию  $sp^3$ ,  $sp^2$  и даже  $sp^1$  связей в структуре (рис.1.2 в), с возможным наличием до 60 % атомов водорода.

В данной работе интерес представляют свойства 3 основных структур: алмазов, углеродных нанотрубок(УНТ) и графена. МЭМС на их основе широко используются в автомобильной промышленности, аэрокосмическая промышленности, биомедицине, приборостроении. На их основе сделаны акселерометры для подушки безопасности, датчики давления для топлива, датчики контроля давления в шинах, датчики микропузырьков для струйного принтера и другие устройства.

### Слайд 3

Главные отличительные черты алмаза — высочайшая среди минералов твёрдость (и в то же время хрупкость), наиболее высокая теплопроводность среди всех твёрдых тел  $900—2300 \frac{Вт}{м \cdot К}$ . большой показатель преломления и дисперсия. Алмаз является широкозонным полупроводником. У алмаза очень низкий коэффициент трения по металлу на воздухе — всего 0,1, что связано с образованием на поверхности кристалла тонких плёнок адсорбированного газа, играющих роль своеобразной смазки. Когда такие плёнки не образуются, коэффициент трения возрастает и достигает 0,6—1,0. Высокая твёрдость обуславливает исключительную износостойкость алмаза на истирание. Для алмаза также характерны самый высокий (по сравнению с другими известными материалами) модуль упругости и самый низкий коэффициент сжатия.

На рисунке 2 представлена структура алмаза. Атомы углерода в алмазе находятся в состоянии  $sp^3$  гибридизации. Именно особенная химическая структура, сильная и короткая ковалентная связь атомов углерода объясняет его высокую твердость.

#### Слайд 4.

Углеродные нанотрубки обладают упругими свойствами. При превышении критической нагрузки в них появляются дефекты. Также нанотрубки обладают огромной теплопроводностью  $6600 \frac{Вт}{м*К}$ .

Любую однослойную углеродную нанотрубку можно представить в виде выкройки из листа графена (представляющего собой сетку из правильных шестиугольников, в вершинах которых расположены атомы углерода), которая задаётся парой чисел (n, m), называемых индексами хиральности (рис. 3.2). Индексы хиральности (n, m) при этом являются координатами радиус-вектора R в заданной на графеновой плоскости косоугольной системе координат, определяющего ориентацию оси трубки относительно графеновой плоскости и её диаметр.

Нанотрубки могут быть как однослойными (ОУНТ) так и многослойными (МУНТ). В зависимости от количества слоев меняются свойства трубок. Это связано с тем, что у МУНТ намного большее разнообразие форм и конфигураций.

## Слайд 5

Графен является двумерным кристаллом, состоящим из одиночного слоя атомов углерода, собранных в гексагональную решётку (рис 4). Объемный графит сам по себе очень анизотропен. Графит обладает высокой твердостью. Это связано с его  $sp^2$  гибридизацией.

Кристаллическая решётка графена состоит из правильных шестиугольников и её можно представить как аналог пчелиных сот, что эквивалентно двумерной гексагональной решётке с атомами углерода расположенными в узлах кристалла.

Также графен обладает более высокой электропроводностью. Графен практически не имеет сопротивления. Это связано с его высокой подвижностью электронов.

## Слайд 6

В Таблице 1 обобщены основные свойства наноматериалов на основе углерода. Они сравниваются с кремнием и сталью. Графен имеет самое высокое теоретическое значение модуля Юнга среди этих материалов: 2 ТПа и предел прочности 130 ГПа. Модуль Юнга силикона составляет 169 ГПа в направлении <110> и 130 ГПа в направлении <100> или примерно 1/10 от значения графена, при этом его прочность на растяжение значительно ниже, чем у графена. Однослойный графен не имеет запрещенной зоны, в то время как легирование или паттерн может открыть запрещенную зону в графене.

Мобильность носителей заряда является важным параметром в физике устройств и она определяется как зависимость скорости дрейфа свободных электронов от приложенного к ним электрического поля. Высокая мобильность имеет важное значение в высокоскоростных электрических устройствах, таких как сверхскоростные транзисторы. Графен имеет самую высокую подвижность в Таблице 1, которая составляет  $2 \times 10^5 \frac{cm^2}{V \cdot c}$ , что на два порядка больше, чем у силикона. Значения для ОУНТ и МУНТ приведены в Таблице 1. Нанотрубки имеют более низкий модуль Юнга и предел прочности по сравнению с графеном. Значения для алмаза также указаны в Таблице 1, так как он изготовлен из трехмерных углеродов на основе структуры  $sp^3$ . Алмаз имеет широкий спектр свойств. Запрещенная зона 5,5 эВ, высокий модуль Юнга 1220 ГПа, предел прочности в 1,2 ГПа и мобильность носителей заряда  $0,79-1,2 \times 10^5 \frac{cm^2}{V \cdot c}$ . Сталь, с другой стороны, является наиболее распространенным материалом и его свойства приведены в Таблице 1 Для сравнения с углеродными материалами. Можно заметить, что модули Юнга и предел прочности значительно ниже, чем у графена и УНТ.