

УДК 620.3

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ ТРАНЗИСТОР НА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ

Таранко Е.В., Индюкова Е.А.

Научный руководитель – Маркова Л.В., д.т.н.

В настоящее время актуальны тонкопленочные технологии, которые применяются в разных областях электроники. Так, большинство плоских дисплеев сегодня используются тонкопленочные транзисторы, которые изготавливаются из аморфного кремния или поликристаллического кремния. Перспективным направлением повышения качества и снижения стоимости тонкопленочных изделий электроники (в разных областях от нанoeлектроники, микрочипов до солнечных батарей) является применение материалов на основе углеродных нанотрубок.

Углеродные нанотрубки представляют собой цилиндрические структуры с диаметром от 1 до 50 нанометров, состоящие из свернутых в трубку графитовых плоскостей. Графитовая плоскость – это непрерывная гексагональная сетка с атомами углерода в вершинах шестиугольников. Нанотрубки прочные и одновременно гибкие. Под действием экстремально высоких механических напряжений нанотрубки не рвутся, не ломаются, а просто перестраиваются. Важной структурной характеристикой нанотрубок является хиральность – тип зеркальной симметрии, при которой левый и правый варианты фигуры не могут быть совмещены друг с другом. Её определяет взаимная ориентация гексагональной сетки графита и продольной оси нанотрубки [1] (рис.1). Хиральность характеризуется двумя числами ( $m$ ,  $n$ ), которые указывают местонахождение того шестиугольника сетки, который в результате свертывания должен совпасть с шестиугольником в начале координат.

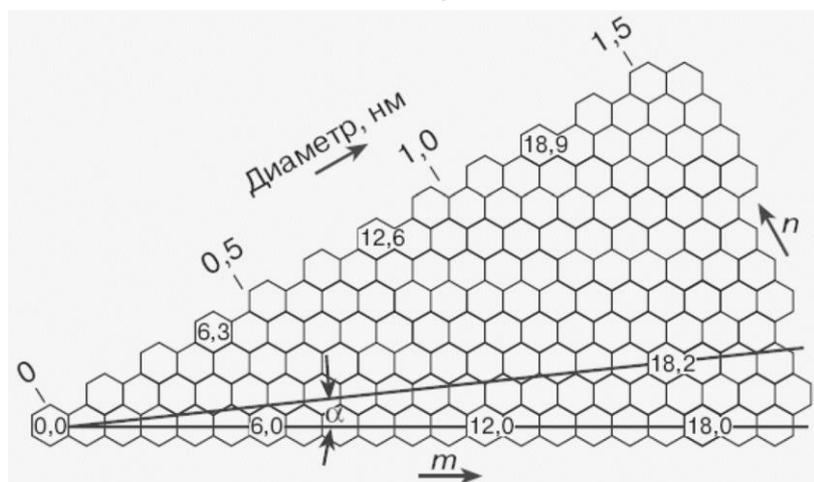


Рис.1. Гексагональная сетка графита

Углеродные нанотрубки могут различаться по длине, диаметру, хиральности, по количеству слоев, и в зависимости от структуры они могут обладать как полупроводниковыми, так и металлическими свойствами. Ширина запрещенной зоны углеродной нанотрубки напрямую зависит от ее угла хиральности и диаметра. Если этими свойствами можно будет управлять, то углеродные нанотрубки позволят создать высококачественные тонкоплёночные транзисторы.

Тонкоплёночный транзистор – разновидность полевого транзистора, принцип действия которого основан на управлении электрическим сопротивлением токопроводящего канала поперечным электрическим полем, создаваемым приложенным к затвору напряжением. В тонкоплёночном транзисторе как металлические контакты, так и полупроводниковый канал проводимости транзистора изготавливаются в виде тонких плёнок (от 1/10 до 1/100 микрона).

Одним из наиболее многообещающих способов получения транзистора на углеродных нанотрубках является метод химического осаждения, который реализуется при атмосферном давлении при высокой температуре (880 С<sup>0</sup>) путем подачи газа, содержащего углерод (СО) с катализатором [2] (рис.2).

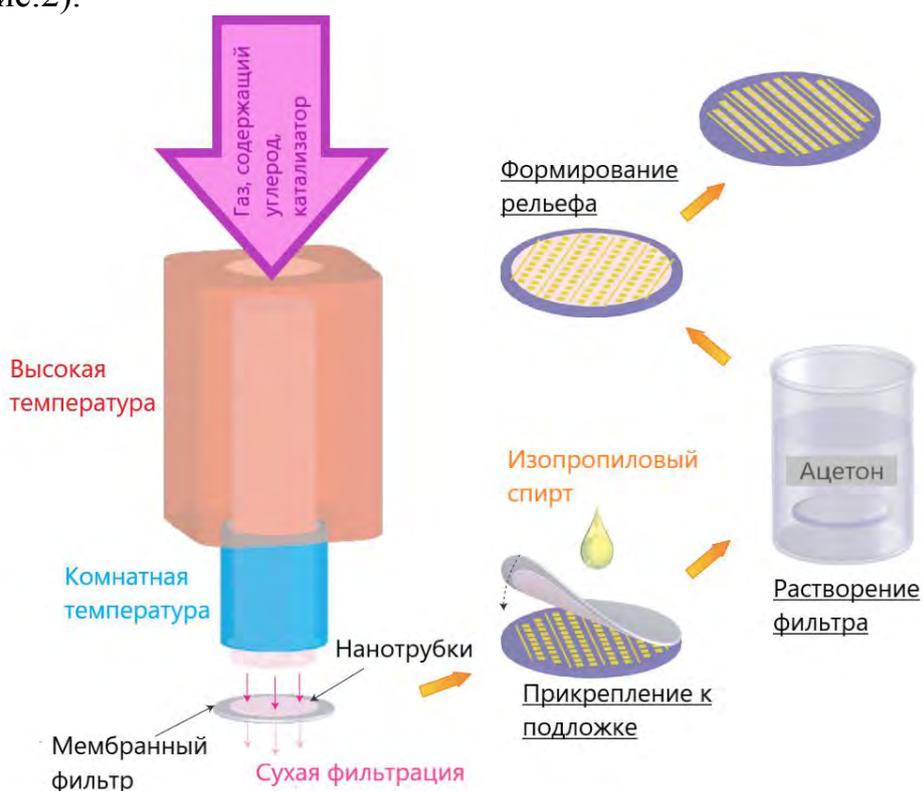


Рис. 2. Получение транзистора на углеродных нанотрубках

Нанотрубки осаждаются на мембранном фильтре при комнатной температуре в течение короткого времени (от 1 до 5 секунд). После осаждения на фильтр наносится несколько капель изопропилового спирта,

чтобы фильтр за счет поверхностного натяжения «сцепился» с подложкой, на которую предварительно нанесены тонкопленочные электроды. Затем подложка помещается в ванну с ацетоном для полного растворения фильтра. Процедура изготовления завершается удалением нанотрубок, расположенных за пределами областей канала, с использованием обработки кислородной плазмой. Перенесенная пленка из углеродных нанотрубок имеет однородную сетчатую морфологию, состоящую из прямых и длинных нанотрубок длиной 10 мкм, что установлено с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Параметры транзистора определяются соотношением долей нанотрубок, обладающих металлическими и полупроводниковыми свойствами. Так, при увеличении доли металлических нанотрубок растёт подвижность носителей заряда, но падает отношение токов в открытом и закрытом состоянии. Оптимизация этого соотношения позволила получить тонкие пленки, на основе которых изготовлены транзисторы, сочетающие одновременно высокую подвижность носителей заряда и высокое отношение токов.

Установлено, что тонкопленочные транзисторы превосходят транзисторы на аморфном кремнии и органических материалах по значениям порогового напряжения, наклону подпороговой характеристики, подвижности носителей заряда, отношению токов в открытом и закрытом состоянии транзистора. Тонкопленочные транзисторы можно размещать на гибких и прозрачных пластиковых подложках. Созданы экспериментальные образцы гибких интегральных схем, в которых кольцевые генераторы и D-триггеры изготовлены на базе новой технологии.

Однако стоимость массового производства тонкопленочных транзисторов на углеродных нанотрубках остается высокой. Кроме того, существует проблема надежности их работы в условиях высокого электрического поля и высокой температуры [3].

### *Литература*

1. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки //Успехи физических наук. – 1997 – (167), №9, С.945-972.
2. Sun D-ming, Timmermans M. Y., Tian Y., et al. Flexible high-performance carbon nanotube integrated circuits. – Nature Nanotechnology. – 2011– (6), P.156-161.
3. Noyce S. G., Doherty J. L., Cheng Z., et al. Electronic Stability of Carbon Nanotube Transistors Under Long-Term Bias Stress //Nano Letters. American Chemical Society. – 2019 (3), P.1460–1466.