

## НАНОАЛМАЗЫ. ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

Мискевич Е.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
филиал Минский радиотехнический колледж  
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Кусенок Е.Н. – преподаватель высшей категории дисциплин общепрофессионального и специального циклов, представитель цикловой комиссии «Микро- и нанoeлектронных технологий и систем».

**Аннотация.** Исследование направлено на изучение одной из формы углеродной структуры – наноалмаз, его истории развития, свойств и применения.

**Ключевые слова:** наноалмаз, синтез, структура, ультрадисперсный, дитонационный.

Последние года ультрадисперсные структуры привлекают всеобщее внимание в связи с широкими возможностями применения в различных сферах жизни человека. Термин «Наноалмазы» применяется для различных типов наноалмазных структур, в зависимости от их получения: ультразвуковой технологией, лазерной технологией и дитонационной.

Наноалмазы – углеродная наноструктура, кристаллическая решётка которой имеет тип алмазной решётки, размер которой составляет от 1 до 10 нм [1]. Вследствие наноразмерных эффектов свойства наноалмазов отличаются от свойств больших алмазов. В их ядре размером 4–5 нм находится до 90 % атомов углерода. Вокруг ядра есть промежуточная оболочка из рентгеноаморфных структур углерода, где содержится до 30 % атомов углерода. На поверхностном слое содержатся как атомы углерода, так и атомы других функциональных групп. Схематическое изображение электрических слоёв представлено на рисунке 1.

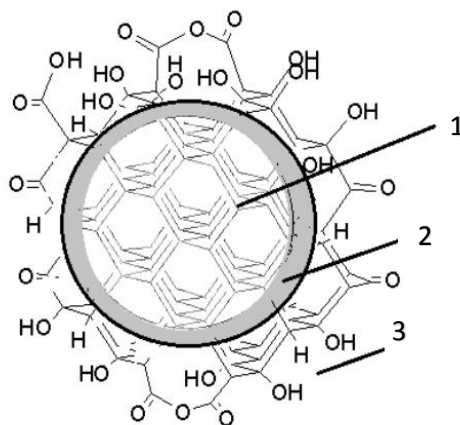


Рисунок 1 – Схематическое изображение электрических полей наноалмаза, где 1 – ядро, 2 – рентгеноаморфный углерод, 3 – поверхностный слой.

Высокоразвитая поверхность, наличие на ней различных химических функциональных групп, а также относительная простота их модификации открывают широкие возможности к прямому взаимодействию частиц дитанических алмазов с биологическими молекулами и структурами.

Структура наноалмаза, разработанная О. Шендеровой, представлена на рисунке 2 [2].

История появления таких алмазов началась в 60-десятых годах XX века. В советском ядерном центре группа исследователей пришли к выводу, что при повышении температуры и давления можно из графитоподобного углерода получить алмаз [4].

Исследователи решили попробовать взорвать сажу в замкнутом объёме и посмотреть на продукты реакции.

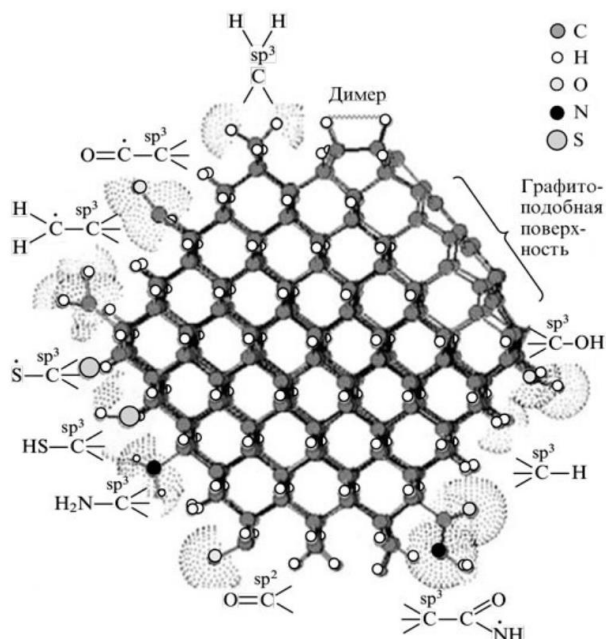


Рисунок 2 – Структура наноалмаза

Оказалось, что можно добиться таких результатов, при условии, что потом продукты быстро охлаждаются, чтобы после взрыва оставалась сажа, которую растворяют, например, в азотной кислоте, которая постепенно убирает весь графитоподобный углерод. Оставшийся остаток и являлся алмазом размером 4–5 нанометра.

На первом этапе исследованию наноалмазов не уделялось должного внимания, так как люди были заинтересованы в создании только больших и красивых алмазов. Конкретное их изучение началось только спустя 20 лет. К этому времени также к экспериментам подключились и другие страны, например, США.

Далее началось изучение процессов структурного фазового перехода наноалмаз – графит, поскольку сохранение высокой температуры при неизбежном падении давления после взрыва вызывало обратный переход части образовавшихся наноалмазов в графит, что снижало производительность процесса.

Синтез наноалмазов реализуется при высоких давлениях и температурах. Как правило, они находятся в диапазонах  $P = (5.0\text{--}7.0)$  Гпа,  $T = (1300\text{--}1800)$  °С. Повышение температуры и давления приводят к росту образований наноалмазов, а увеличение времени – к росту размера получаемых структур.

В качестве исходного сырья для синтеза наноалмазов используют смесь тротила и гексогена в соотношении 60/40. Эти вещества обладают достаточной мощностью и экономически вполне доступны.

В процессе синтеза образуется денотационный углерод, который в сухом виде представляет собой чёрный порошок. Содержание алмазов в таком порошке меняется от 40 до 95 %, в зависимости от того, как правильно проведён процесс.

Очистка наноалмазов от неалмазных форм основана на различии химических свойств того и того компонента денотационного углерода. Например, неалмазные формы углерода реагируют с окислителями, а металлы, их окислы и соли – со щелочами и кислотами.

Окисление неалмазных форм углерода можно разделить на два метода – газофазный и жидкофазный. Наиболее распространённым газофазным окислителем является кислород. Для снижения температуры начала процесса окисления используют активатор окисления, такие как пятиокись ванадия  $V_2O_5$ . Обычно такой процесс происходит при температуре 200–350 °С. Главное преимущество – простота. Но такой процесс трудно контролировать, температура может повышаться, и вместе с неалмазными формами углерода могут окисляться и наноалмазы. Также газовое окисление может проходить в озоне. Его преимуществом

является более высокая степень очистки, но аппаратура для этого процесса сложная и дорогая. Наиболее распространёнными являются методы жидкофазного окисления. Например, порошок могут очищать в среде концентрированной серной кислоты. Такой процесс происходит при температуре 120–200 °С, но остаётся большое количество отходов. Также применяют окислитель хлорной кислотой  $\text{HClO}_4$ . Преимуществом данного процесса является более низкая температура и отсутствие дополнительных загрязнений, небольшой расход окислителя.

Применение наноалмазов обширно. Эти структуры могут использоваться в абразивах для сверхтонкой механической полировки. Такие составы дают возможность получения поверхностей с шероховатостью, не превышающей величину 0,3 нм [3]. Также они используются в качестве компонентов связующего вещества в абразивных алмазных инструментах. Такое применение алмазов позволяет превысить прочность и эластичность инструмента.

Наиболее перспективная область использования наноалмазов – это металлокомпозитные покрытия. Износостойкость таких покрытий возрастает в 4–9 раз, что используется в машинах и механизмах, содержащих трущиеся покрытия. К таким устройствам относятся авиационные двигатели, насосы для химических производств и так далее. Такие покрытия обладают повышенной эластичностью, что позволяет выдерживать значительные деформации. Также наноалмазы применяются как центры кристаллизации для технологии алмазных и алмазоподобных плёнок.

Возможности использования наноалмазов в биологии и медицине определяются набором их уникальных свойств. В частицах ультрадисперсных алмазов размером 4 нм до 15 % атомов находится на поверхности, поэтому эти структуры обладают высокой сорбционной ёмкостью. Их поверхность гидрофильна, что отличает наноалмазы от всех других форм углерода.

У наноалмазов огромные перспективы использования. Они могут использоваться в качестве внешних сенсоров, чипов, адресантов лекарственных веществ в организм. Изучение наноалмазных структур, начавшееся относительно недавно, является все более актуальным и интересным.

### **Список литературы**

1. А.Я. Вуль, О.А. Шендерова – «Детонационные наноалмазы. Технология, структура, свойства и применения», 2016, Санкт-Петербург.
2. <https://www.sigmaaldrich.com/BY/en/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/biosensors-and-imaging/monodispersed-nanodiamonds-applications>.
3. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127521006468>.
4. <https://www.youtube.com/watch?v=GtaQk2om2ro>.