

УДК 544.774.2:621.38-022.532

АЭРОГЕЛИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Гурин Е.Е., Демидко Н.А., Борис А.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹,
г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Аэрогели - уникальные наноструктурированные материалы, перспективные для применения в нанoeлектронике. Их основные физические свойства: сверхнизкая плотность, высокая пористость, рекордно низкая теплопроводность и особенности электропроводности. Графеновый аэрогель сочетает в себе высокую проводимость с развитой поверхностью. Основные области применения: низкодieleктрические материалы, суперконденсаторы, термоизоляция и газовые сенсоры.

К

л
ю
ч

Введение. В современных условиях нанoeлектроника требует создания новых материалов с уникальными физическими и химическими свойствами. Традиционные материалы не всегда удовлетворяют требованиям миниатюризации, энергоэффективности и высокой производительности устройств. Одним из перспективных направлений является использование аэрогелей — наноструктурированных материалов с крайне низкой плотностью и высокой пористостью. Их уникальные свойства позволяют рассматривать их как основу для разработки новых элементов нанoeлектроники, включая сенсоры, накопители энергии и теплоизоляционные компоненты.

Основная часть. Аэрогели — класс материалов, представляющих собой гель, в котором жидкая фаза полностью замещена газообразной. Эти очень твердые материалы (рисунок 1) на 99,8% состоящие из воздуха способны выдерживать вес, превышающий их собственный в 4000 раз. Аэрогели огнеупорны, воздухопроницаемы, способны впитывать воду или масло, могут, в зависимости от материала изготовления, служить электрическим проводником или не менее эффективным изоляционным материалом [1].

р
а
ф
е
н
о
в
ы
й

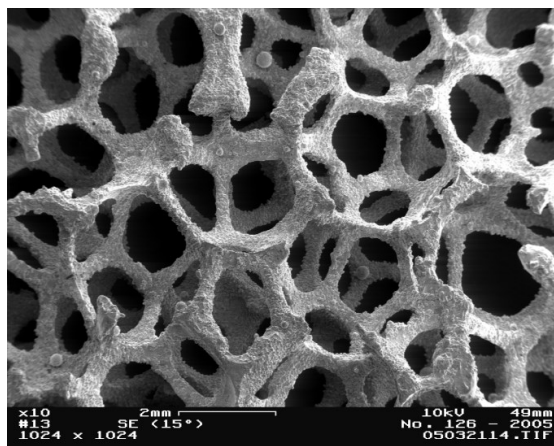


Рисунок 1 - Структура аэрогеля

а
э
р
о
г
е
л
ь

у
г
л
е
р
о
д
н
ы
е

Наиболее характерные свойства аэрогеля:

- Очень низкая плотность;
- Крайне низкая теплопроводность (до 0.016 Вт/(мК).)
- Низкая скорость распространения звука (до 70 м/с);
- Чрезвычайно низкий показатель преломления света (до 1,0002);
- Электрическая проводимость может меняться в широких пределах в зависимости от используемого материала.

У аэрогелей есть еще один уникальный параметр — отношение площади полной поверхности к его весу: до 3200 м²/г. Это означает, что покрытие аэрогелей (удельная площадь поверхности) одного грамма этого материала хватит, чтобы равномерно покрыть поверхность объекта.

м
а
т
е
р
и
а
л
ы

Аэрогель был впервые создан в 1931 году Сэмюэлем Кистлером (США). Его цель заключалась в том, чтобы заменить жидкость в геле на газ, что привело к созданию структуры, состоящей почти полностью из воздуха. Этот процесс называется "сверхкритической сушкой", и он позволяет сохранить оригинальную форму геля, но при этом сделать его невероятно легким и пористым.

Несмотря на малую массу, аэрогели способны выдерживать нагрузку, превышающую их вес в тысячи раз. Такие характеристики делают их уникальными среди современных материалов и открывают широкие возможности применения, включая наноэлектронику.

Наноструктура аэрогелей представляет собой уникальную архитектуру твердого тела, сформированную связанной трехмерной сеткой, состоящей из наноразмерных частиц и кластеров. Данная сетка характеризуется наличием разветвленной системы пор, размер которых преимущественно лежит в мезодиапазоне (от 2 до 50 нанометров). Именно такая ультрадисперсная и высокопористая архитектура обуславливает экстремальные значения удельной площади поверхности материала, $3200\text{ м}^2/\text{г}$.

Электрофизические свойства аэрогелей являются прямым следствием их уникальной наноструктуры и демонстрируют ряд аномальных явлений, нехарактерных для сплошных сред.

Электропроводность аэрогелей носит сложный, нетривиальный характер и в значительной степени зависит от природы материала каркаса. В случае диэлектрических аэрогелей, таких как кремнезем, проводимость практически отсутствует, и материал ведет себя как идеальный изолятор. В полупроводниковых и углеродных аэрогелях механизм переноса заряда определяется прыжковой проводимостью, где носители заряда мигрируют путем туннелирования или активированных прыжков между локализованными состояниями в наночастицах или между отдельными фрагментами каркаса. Проводимость в таких системах носит активационный характер и сильно зависит от температуры, подчиняясь законам, отличным от классической металлической или полупроводниковой проводимости. Важно отметить, что высокая пористость и разветвленность путей переноса приводят к тому, что эффективная проводимость аэрогеля на несколько порядков ниже проводимости компактного материала того же состава.

Диэлектрические свойства аэрогелей также демонстрируют ярко выраженную зависимость от наноструктуры. Благодаря тому, что материал представляет собой композит типа "диэлектрик-воздух", где основную долю объема занимает газовая фаза, эффективная диэлектрическая проницаемость аэрогелей чрезвычайно низка и приближается к единице, что делает их одними из лучших твердых диэлектриков. В переменных электрических полях наблюдаются релаксационные явления, связанные с поляризацией на границах раздела наночастиц и миграцией заряда в связанной сетке, что приводит к частотной дисперсии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Теплопроводность аэрогелей является их уникальной характеристикой и достигает рекордно низких значений, зачастую ниже, чем у неподвижного воздуха. Это обусловлено тремя факторами: 1) твердотельная теплопроводность подавлена из-за извилистости и фрагментарности каркаса, а также из-за высокого теплового сопротивления в наноконтактах между частицами; 2) конвекция газа в порах нанометрового размера практически полностью подавлена; 3) вклад излучения также снижается благодаря многократному рассеянию инфракрасного излучения на стенках пор и частицах. Таким образом, аэрогели выступают в роли исключительно эффективных теплоизоляторов.

Поведение аэрогелей при высоких температурах характеризуется сложной динамикой структурных изменений. При нагреве наблюдается необратимая усадка материала, обусловленная спеканием наночастиц и коалесценцией пор, что приводит к уплотнению структуры и, как следствие, к изменению всех электрофизических свойств. Проводимость, изначально низкая, может несколько возрасти за счет улучшения контактов между частицами, однако диэлектрические свойства и теплопроводность претерпевают существенные изменения. При температурах, близких к температуре плавления или разложения материала каркаса, происходит деградация наноструктуры с потерей уникальных свойств, хотя некоторые тугоплавкие аэрогели, например, на основе оксидов алюминия или циркония, способны сохранять структурную целостность до весьма высоких температур, что позволяет использовать их в качестве высокотемпературной изоляции.

Графеновый аэрогель представляет собой трехмерную макроскопическую структуру, собранную из двумерных листов графена, и наследует уникальные свойства своего наномасштабного предшественника, транслируя их в объемный материал. Структурно он формируется за счет образования связанной сетки, в которой отдельные слои графена, состоящие из монослоев sp^2 -гибридизованных атомов углерода, соединяются между собой, образуя высокопористый каркас с иерархической системой пор, простирающейся от нанометров до микрометров. В отличие от идеальной двумерной структуры самого графена, где электроны движутся баллистически без рассеяния, в объеме аэрогеля перенос заряда реализуется через сложную сеть контактов между отдельными листами и их фрагментами. Высокая проводимость графенового аэрогеля, достигающая значительных значений, обеспечивается высокой электропроводностью самих графеновых слоев в сочетании с формированием перколяционной сети, пронизывающей весь объем материала, однако она ухудшается за счет контактного сопротивления в местах соединения отдельных листов [2].

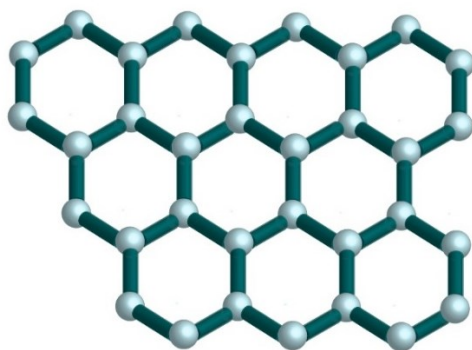


Рисунок 2 – Структура графена

Этот уникальный материал обладает целым рядом уникальных свойств: 1) экстремально низкой плотностью, 2) рекордной удельной поверхностью покрытия, 3) высокой упругостью и способностью к значительным обратимым деформациям, 4) химическую инертность. Сочетание высокой электропроводности с огромной удельной поверхностью создает предпосылки для эффективного взаимодействия материала с молекулами газов или химическими соединениями. Именно это сочетание делает графеновый аэрогель чрезвычайно перспективным для применения в сенсорных системах. При адсорбции молекул-аналитов на поверхность графена происходит изменение локального электронного окружения, что модулирует проводимость материала в целом, причем благодаря высокой площади поверхности даже незначительные концентрации вещества вызывают детектируемое изменение электрического сигнала. Таким образом, графеновый аэрогель выступает как высокочувствительный резистивный сенсор, способный регистрировать предельно малые количества газов или химических веществ, а его развитая пористая структура обеспечивает быструю диффузию аналита к активным центрам и, следовательно, малое время отклика [3].

Получение аэрогелей — это многостадийный процесс, основной задачей которого является удаление жидкости из структуры геля без разрушения его хрупкого твердого каркаса.

Основные этапы синтеза – золь-гель процесс: смешивание прекурсоров (например, алкоксидов кремния) для формирования золя, который затем переходит в гель (трехмерную сетку, заполненную жидкостью); созревание (Старение): выдержка геля в растворе для укрепления его структуры. Промывка и замена растворителя: Постепенная замена исходной жидкости (обычно воды) на спирт или другой растворитель, подходящий для выбранного метода сушки.

Существуют разные методы сушки (превращение геля в аэрогель):

Сверхкритическая сушка: жидкость в порах доводят до сверхкритического состояния, где исчезает граница между жидкой и газообразной фазами. Это позволяет избежать капиллярного давления, которое разрушило бы поры. Лиофилизация или сушка вымораживанием: гель замораживают, а растворитель удаляют путем сублимации (переход из твердого состояния в газ, минуя жидкое) в вакууме. Полученные материалы иногда называют криогелями. Сушка при атмосферном давлении: более дешевый метод, требующий модификации поверхности геля для снижения поверхностного натяжения или использования специальных химических добавок, предотвращающих усадку при обычном испарении.

Заключение. Аэрогели представляют собой уникальные наноструктурированные материалы с выдающимися физическими свойствами. Их высокая пористость, малая плотность и возможность регулирования проводимости делают их перспективными для применения в нанoeлектронике. Особенно важным является развитие графеновых аэрогелей, которые сочетают в себе механическую прочность и высокую электропроводность. Таким образом, аэрогели могут сыграть ключевую роль в создании новых электронных устройств и технологий будущего.

Список использованных источников:

1. Аэрогель [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%8D%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D0%BB%D1%8C>
2. Аэрографен [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://translated.turbopages.org/proxy_/en-ru.ru.ecf1a3e5-69bb17f9-d3c0604b-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Aerographene
3. Исследование графеновых аэрогелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.18321/cpc543>

UDC 544.774.2:621.38-022.532

AEROGELS AS PROMISING NANOSTRUCTURED MATERIALS FOR APPLICATIONS IN NANOELECTRONICS

Gurin E.E., Demidko N.A., Borys A.A., students

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus*

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. Aerogels are unique nanostructured materials with promising applications in nanoelectronics. Their key physical properties include ultra-low density, high porosity, record-low thermal conductivity, and exceptional electrical conductivity. Graphene aerogel combines high conductivity with a large surface area. Key applications include low-dielectric materials, supercapacitors, thermal insulation, and gas sensors.

Keywords: graphene aerogel, carbon nanomaterials, thermal insulation, catalysis, sensors, supercapacitors.