

TÁBIYIY HÁM TEXNIKALÍQ ILIMLER

Fizika-matematika. Texnika. Informatika

ОПТИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ,
СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ВОДНОЙ СРЕДЕАсанов Дауранбек Жадигерович – доктор философии по физико-математическим наукам
dauranbek83@list.ru

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

SUVLI MUHITDA LAZER ABLYATSIYASI USULI BILAN HOSIL QILINGAN
NIKEL NANOZARRALARINING OPTIK VA TARKIBIY TAVSIFLARIAsanov Dauranbek Jadigerovich – fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori
Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika institutiOPTICAL AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF NICKEL NANOPARTICLES FORMED
BY LASER ABLATION IN AN AQUEOUS MEDIUMAsanov Dauranbek Jadigerovich – Doctor of Philosophy in Physical and Mathematical Sciences
Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz

Таянч сўзлар: никел нанозаррачалари, суйуқликда лазер абляцияси, электрон микроскопия, электрон дифракция, плазмон ютилиши, қуёш энергетикаси.

Резюме. Ушбу ишда сув муҳитида металл нишонни лазер абляцияси усули билан олинган никел нанозаррачаларини экспериментал тадқиқ этиш натижалари келтирилган. Тадқиқотнинг максоди уларнинг морфологик, таркибий ва оптик хоссаларини ўрганишдан иборат. Аниқланишича, нанозаррачалар асосан сферик ва кўпёқлик шаклга эга бўлиб, уларнинг характери ўлчамлари 30-50 нм ни ташкил этади. Электрон-дифракцион таҳлил натижалари юз марказли кубик панжарага эга бўлган никелнинг кристалл фазаси ва аморф таркибий қисм мавжудлигини кўрсатди. Оптик ютилиш спектрларида локализацияланган плазмон резонанси билан боғлиқ бўлган ютилиш тасмаси аниқланди. Шунингдек, никел нанозаррачаларини сувга киритиш қуёш нурланишининг ютилиш коэффицентини ошириши кўрсатилди, бу эса уларни фототермик тизимларда қўллаш истикболли эканини белгилайди.

Ключевые слова: никелевые наночастицы, лазерная абляция в жидкости, электронная микроскопия, электронная дифракция, плазмонное поглощение, солнечная энергетика.

Резюме. В работе представлены результаты экспериментального исследования наночастиц никеля, полученных методом лазерной абляции металлической мишени в водной среде. Целью исследования являлось изучение их морфологических, структурных и оптических свойств. Установлено, что наночастицы имеют преимущественно сферическую и многогранную форму при характерных размерах 30-50 нм. Электронно-дифракционный анализ выявил наличие кристаллической фазы никеля с гранецентрированной кубической решёткой и аморфной составляющей. В спектрах оптического поглощения обнаружена полоса, обусловленная локализованным плазмонным резонансом. Показано, что введение наночастиц никеля в воду приводит к увеличению коэффициента поглощения солнечного излучения, что определяет перспективность их применения в фототермических системах.

Key words: nickel nanoparticles, laser ablation in liquids, electron microscopy, electron diffraction, plasmonic absorption, solar energy.

Summary. This paper presents the results of an experimental study of nickel nanoparticles obtained by laser ablation of a metallic target in an aqueous medium. The aim of the study was to investigate their morphological, structural, and optical properties. It was established that the nanoparticles are predominantly spherical and polyhedral in shape, with characteristic sizes of 30-50 nm. Electron diffraction analysis revealed the presence of a crystalline nickel phase with a face-centered cubic lattice as well as an amorphous component. In the optical absorption spectra, a band associated with localized surface plasmon resonance was observed. It is shown that the introduction of nickel nanoparticles into water leads to an increase in the solar radiation absorption coefficient, which indicates the перспективность their application in photothermal systems.

Введение. В условиях роста мирового энергопотребления актуальной задачей является разработка эффективных способов использования возобновляемых источников, прежде всего солнечного излучения. Эффективность традиционных солнечных тепловых систем ограничена низкой способностью обычных теплоносителей поглощать излучение в широком спектральном диапазоне. Одним из перспективных решений является модификация теплоносителей металлическими наночастицами, обладающими уникальными оптическими свойствами, высокой удельной поверхностью и термостойкостью.

Среди переходных металлов никель привлекает внимание благодаря доступности, коррозионной устойчивости и магнитным свойствам, что позволяет не только усиливать поглощение излучения, но и управлять распределением частиц во внешнем магнитном поле. Физический синтез наночастиц методом лазерной абляции в жидкости обеспечивает высокую чистоту материала без химических реагентов. Влияние параметров лазера и свойств среды определяет морфологию, структуру и размер наночастиц.

Цель работы - синтез наночастиц никеля в воде и изучение их морфологических, структурных и

оптических характеристик для применения в солнечных тепловых системах.

Материалы и методы исследования. Наночастицы никеля синтезировались методом лазерной абляции металлической мишени из никеля высокой чистоты (99,99 %), погружённой в дистиллированную воду. В качестве источника излучения использовался импульсный (лазер LS 2137 Lotis-ТП) Nd:YAG-лазер с длиной волны 1064 нм, энергией импульса 120 мДж и длительностью 20 нс. Частота следования импульсов составляла 5 Гц, диаметр сфокусированного пятна на поверхности мишени - около 1 мм. Продолжительность обработки составляла 15 мин, в результате чего формировался устойчивый коллоидный раствор сероватого цвета. Морфология и размеры наночастиц исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии. Структурное состояние оценивалось по электронно-дифракционным картинам. Оптические свойства коллоидных растворов изучались методом спектрофотометрии в диапазоне длин волн 300-900 нм. Интенсивность прохождения света через коллоидные растворы описывалась законом Бугера-Ламберта-Бера [1-5]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha l}$$

где I_0 - интенсивность падающего излучения, I - интенсивность прошедшего света, α - коэффициент поглощения, l - толщина оптического слоя. Для металлических наночастиц существенный вклад в формирование спектров вносит локализованный поверхностный плазмонный резонанс, зависящий от размеров, формы и концентрации частиц.

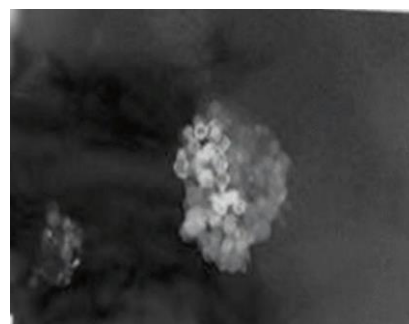
Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлены типичные микрофотографии наночастиц никеля, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Анализ изображений демонстрирует значительное морфологическое разнообразие частиц: среди них встречаются как объекты с выраженной кристаллографической огранкой, так и почти сферические частицы. Формирование наночастиц при лазерной абляции в жидкости может протекать по двум основным механизмам: «пар-жидкость» (п → ж) и «пар-кристалл» (п → к) [4-6]. Частицы, образующиеся по механизму п → ж, первоначально находятся в аморфном состоянии, однако при дальнейшем охлаждении могут кристаллизоваться по механизму ж → к. На рисунках 1а и 1б представлены наночастицы, полученные в водной среде. Частицы, формировавшиеся по механизму п → к, демонстрируют выраженную кристаллографическую огранку и имеют средний размер около 20-25 нм (рис. 1а, б). Аморфные частицы, образовавшиеся по механизму п → ж, преимущественно сферические, с диаметром около 150 нм (рис. 1в). Внутри таких аморфных объектов часто обнаруживаются кристаллические включения размером примерно 20 нм, формирующиеся по механизму п → ж → к, преимущественно вблизи поверхности частицы.

Эти наблюдения подтверждают, что при лазерной абляции в жидкости могут формироваться как аморфные, так и кристаллические наночастицы, а их морфология и структура сильно зависят от параметров лазерного воздействия [5-8].

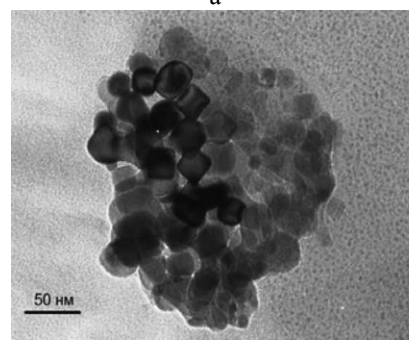
Таблица 1-Размерные характеристики наночастиц никеля

Параметр	Значение
Минимальный размер, нм	25
Максимальный размер, нм	60
Средний размер, нм	40 ± 10
Преобладающая форма	Сферическая, многогранная
Тип структуры	кристаллическая, аморфная

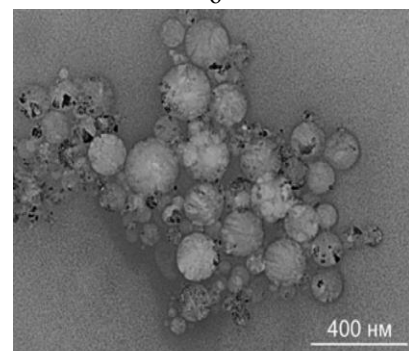
Данные таблицы отражают статистические результаты обработки серии электронно-микроскопических изображений. Диапазон размеров частиц от 25 до 60 нм указывает на формирование нанодисперсной системы без выраженных микронных агломератов. Средний размер около 40 нм соответствует оптимальному диапазону для проявления плазменных эффектов в видимой области спектра. Наличие как сферических, так и многогранных частиц подтверждает неравновесный характер процессов конденсации вещества в зоне воздействия лазерного излучения.



а



б



в

Рисунок 1. ПЭМ-изображения наночастиц никеля, сформированных при лазерной абляции в воде:

а, б - частицы, образованные по механизму «пар - кристалл»; в - частицы, образованные по механизму «пар - жидкость - кристалл».

Представленные изображения демонстрируют, что морфология частиц определяется термодинамическими условиями в зоне абляции и скоростью охлаждения материала в жидкой среде. Частицы с выраженной огранкой являются индикатором кристаллизации из паровой фазы, тогда как сферические частицы отражают стадию затвердевания расплавленных капель. Наличие кристаллитов внутри сферических частиц указывает на поэтапный характер структурной релаксации и свидетельствует о смешанном фазовом состоянии материала [7-10].

На рисунке 2 представлена электронно-дифракционная картина наночастиц никеля. Дифракционный узор характеризуется системой концентрических колец, что является типичным признаком поликристаллической структуры. Идентификация межплоскостных расстояний позволила соотнести наблюдаемые дифракционные кольца с отражениями от плоскостей (111), (200) и (220) гранецентрированной кубической решётки никеля. Наличие диффузного фона указывает на присутствие аморфных областей, что согласуется с результатами морфологического анализа.

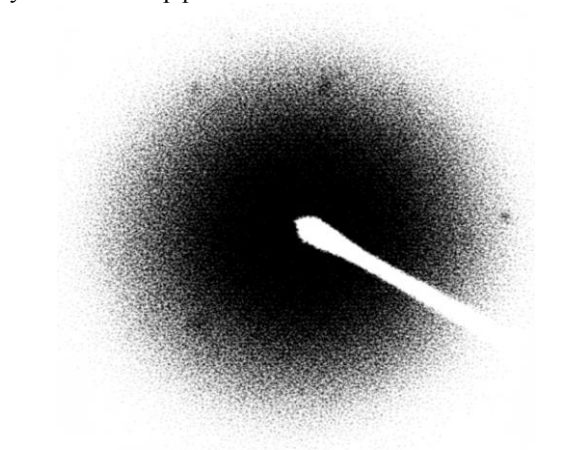


Рисунок 2. Электронограмма наночастиц никеля, полученных методом лазерной абляции в воде

Электронно-дифракционные данные свидетельствуют о формировании кристаллической фазы никеля при одновременном присутствии неупорядоченной составляющей. Такое сочетание может быть обусловлено высокими скоростями охлаждения частиц в водной среде, при которых часть объёма не успевает полностью перекристаллизироваться. Смешанное фазовое состояние является характерным для наночастиц, синтезированных в условиях быстрого неравновесного охлаждения [9-11].

На рисунке 3 приведены спектры оптического поглощения коллоидных растворов наночастиц никеля при различных концентрациях. Во всех случаях в спектрах наблюдается выраженный максимум в области 500-600 нм. Данная полоса обусловлена возбуждением локализованных поверхностных плазмонов – коллективных колебаний электронов проводимости в металлических наночастицах под действием электромагнитного поля. Положение и ширина полосы определяются распределением частиц по размерам и формам, а также степенью их агрегации.

Таблица 2 - Оптические характеристики коллоидных растворов

Концентрация	λ_{max} нм	Оптическая плотность
Низкая	520	0,35
Средняя	540	0,58
Высокая	560	0,82

Представленные данные демонстрируют смещение максимума полосы поглощения в длинноволновую область с ростом концентрации наночастиц. Это может быть связано с увеличением эффективного оптического размера частиц и усилением электромагнитного взаимодействия между ними. Рост оптической плотности растворов отражает увеличение вклада наночастиц в процесс поглощения излучения [4-10].

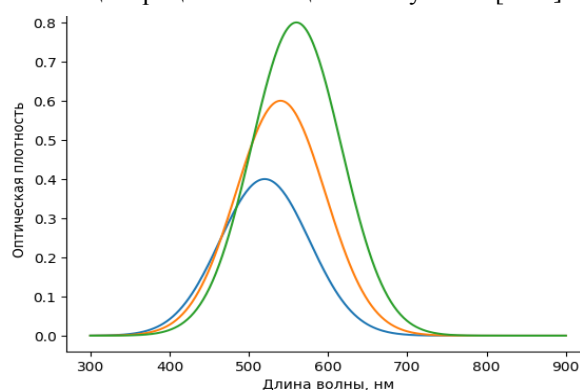


Рисунок 3. Спектры оптического поглощения коллоидных растворов наночастиц никеля

Форма спектров указывает на доминирующую роль плазмонного механизма поглощения. Ширина полосы связана с наличием распределения частиц по размерам и формам, а также с потерями энергии на поверхностное рассеяние электронов. Полученные спектральные характеристики подтверждают способность наночастиц никеля эффективно поглощать излучение в видимой области спектра.

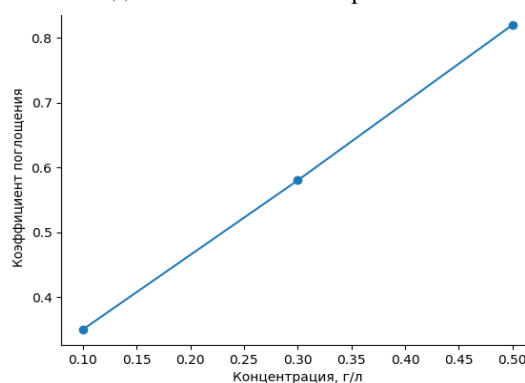


Рисунок 4. Зависимость коэффициента оптического поглощения от концентрации наночастиц никеля

Практически линейный характер зависимости свидетельствует о применимости закона Бугера-Ламберта-Бера для описания оптических свойств данных коллоидных систем. Отсутствие выраженных отклонений от линейности указывает на незначительный вклад многократного рассеяния в исследуемом диапазоне концентраций.

Это позволяет рассматривать такие растворы как перспективные среды для управляемого поглощения солнечного излучения [8-11].

Заключение. Методом лазерной абляции металлической мишени в воде синтезированы наночастицы никеля размером 30-50 нм. Частицы обладают смешанной фазовой структурой, включающей кристаллические и аморфные области, при этом электронно-дифракционный анализ подтвердил формирование гранецентрированной кубической решётки. В спектрах оптического поглощения обнаружена полоса 500-600 нм, обусловленная

локализованным поверхностным плазмонным резонансом. Рост концентрации наночастиц приводит к линейному увеличению коэффициента поглощения, что делает их перспективными для солнечных тепловых установок и фототермических устройств.

Результаты подчеркивают важность дальнейших исследований механизмов формирования и рекристаллизации наночастиц под воздействием импульсного лазерного излучения.

Литература

1. Бернер Г.Я., Раяк М.Б., Кинкер М. Солнечная энергетика за рубежом. // Новости теплоснабжения. 2009. № 5. – С. 1-5.
2. Казилин Е.Е. и др. Исследование коллоидных растворов селена, полученных лазерными методами. // Перспективные материалы. 2008. № 3. – С. 60-63.
3. Бураков В.С. и др. Электроразрядный синтез наноразмерных структур. Труды II Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: 2007. – С. 158-162.
4. Маркевич М.И. и др. Формирование коллоидных растворов кремния. // Материалы и структуры современной электроники. 2018. – С. 302-305.
5. Гончаров В.К. и др. Возможности получения наночастиц никеля в водной среде с помощью лазерного воздействия. // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, № 2. – С. 206-210.
6. Гончаров В.К. и др. Формирование коллоидных растворов металлов в воде методом лазерной абляции. // Актуальные проблемы физики твёрдого тела. – Минск: 2009. – С. 381-382.
7. Шафеев Г.А. Лазерная абляция твёрдых тел в жидкостях: физические основы и применение. // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, № 10. – С. 1065-1091.
8. Кабанов В.В., Котов Ю.А. Наночастицы металлов: методы получения и оптические свойства. – Москва: «Физматлит», 2012.
9. Ласковнёв А.П., Щербакова Е.Н., Анисович А.Г., Маркевич М.И., Журавлёва В.И., Жигулин Д.В., Асанов Д.Ж. Синтез наноструктур фосфида индия методом импульсной лазерной абляции мишени InP в водной среде. ISSN 1818-9830. // Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2024, №2(108). –С. 162-167.
10. Маркевич М.И., Асанов Д.Ж., Камалов А.Б. Формирование наночастиц в водной среде из мишени силумина. ISSN 2010-720X. // Наука и общество Научно-методический журнал. №1. 2023. – С 22-24.
11. Markevich M.I., Kamalov A.B., Asanov D.J., Esbergenov D.M., Kazakbaeva M.A. Specific features of carbon nanoparticle formation under the influence of a laser operating in a double-pulse generation mode. // East european journal of physics. – Ukrain: 2024/2. – P. 394-397.