

08,10

Топологические дендритные наноструктуры с регулируемой микро/наномодификацией с управляемыми электрофизическими характеристиками в эксперименте при лазерной абляции твердой поверхности нержавеющей стали

© Д.Д. Тумаркина, А.Ф. Лелекова, К.С. Хорьков, Д.Н. Бухаров, С.М. Аракелян

ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Россия

E-mail: tumarkina.darya@mail.ru

Поступила в Редакцию 1 июня 2025 г.

В окончательной редакции 6 августа 2025 г.

Принята к публикации 19 августа 2025 г.

Исследованы топологические дендритные структуры с регулируемой микро/наномодификацией на поверхности, полученные в разных схемах лазерного эксперимента с нержавеющей сталью AISI 304. Рассмотрен синтез таких структур и методика измерений их характеристик в определенных конфигурациях на поверхности сталей с высокоэнтропийным составом. Измерения проведены при помощи сканирующей туннельной/атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния. Выполнены модельные расчеты фрактальных размерностей для полученных неоднородных топологических поверхностных объектов в образцах с управляемой дендритной фрактальной структурой. Обсуждаются вопросы электрофизики подобных структур и их возможные приложения с использованием результатов проведенных исследований. Представлены результаты экспериментов по измерениям зависимостей для вольт-амперных характеристик микро/наноструктурированной поверхности образцов нержавеющей стали AISI 304, модифицированной при лазерном воздействии.

Ключевые слова: тонкие пленки, поверхность твердого тела, лазерное воздействие, конфигурации дендритов, фрактальная размерность, высокоэнтропийные соединения с управляемой топологией, фазовые превращения.

DOI: 10.61011/FTT.2025.09.61626.153-25

1. Введение

Материалы с поверхностными 2D-наноструктурами в комплексах металлов и полупроводников представляют фундаментальное направление для современной физики фазовых состояний твердого тела, перспективное для различных приложений [1–6]. В таких микро/наносистемах кластерного типа, разных конфигураций и топологий, регулируемых при их синтезе, возникают специфические локализованные состояния с их управляемыми функциональными характеристиками, в частности, электрофизическими. Это создает возможность разработки на данной основе различных устройств микро/наноэлектроники и фотоники на новых физических принципах [4–6].

Для регулируемого получения подобных структур широко используются лазерные схемы эксперимента, среди которых весьма перспективны технологии лазерной абляции поверхности твердого тела с выбросом вещества при лазерном воздействии в разных его модификациях (ср. [7,8]). Эффект лазерной абляции зависит от среды, в которой находится мишень, в частности, в жидкости. Здесь могут возникать экстремальные условия, при которых, например, графит переходит в алмазоподобные структуры при относительно маломощном лазерном излучении из-за локальных гидродинамических удар-

ных процессов в фокусе лазерного пучка в жидкости (см. [5,9,10]).

Речь идет о синтезируемых тонкослойных микро/наноструктурах на поверхности образца, возникающих при прямом воздействии на его материал лазерных импульсов и пучков в разных режимах. Например, это может происходить с учетом осаждения и конденсации продуктов абляции на поверхность образца из газопаровой фазы при термическом воздействии последовательностью лазерных импульсов и пучков, а также в результате двухэтапного процесса — получения наночастиц в коллоиде при лазерной абляции материала в жидкости с последующим их осаждением из коллоида на твердую подложку управляемым образом при сканировании лазерным лучом в объеме коллоида. При этом специфика физики явлений при осаждении объектов на твердую поверхность подложки определяется степенью шероховатости подложки и теплопроводностью ее материала. При рассмотрении электрофизики подобных устройств в первую очередь исследованию подлежат процессы управления их электропроводностью в зависимости от конфигурации поверхностной микро/нанотопологии.

Прохождение электрического тока в структурах, где происходит чередование на поверхности проводящих и непроводящих локальных областей, можно описывать в рамках представлений теории перколяции [4,11], при-

менимой для такого класса объектов, и они могут быть отнесены к топологическим изоляторам [12].

Подобные кластерные структуры представляют наибольший интерес для применения в тонкопленочных металлических системах типа омических и барьерных контактов, тонкопленочных резисторов, конденсаторов, а также при передаче зарядовых носителей через контактные площадки и т. п. При этом могут реализовываться одноэлектронные квантовые режимы с переключением режимов как у различного типа диодов, в частности, туннельных (ср. [4,11,12]).

Перколяционные эффекты в таких металлических пленках в основном рассматриваются с изучением влияния поперечных (перпендикулярно плоскости подложки) размеров (толщин) на их электропроводность. Однако электрофизика подобного рода дискретных топологических структур с неоднородностями — дендритами микро/нанометрового размера зависит от их фрактальной геометрии (ср. [12–14]).

Эти проблемы исследованы нами в настоящей статье для ансамбля дендритов на поверхности нержавеющей стали марки AISI 304, синтезированных экспериментально в результате двухимпульсной лазерной абляции (ср. [15]). Полученные результаты могут быть рассмотрены также и по аналогии как для твердотельного материала высокоэнтропийного сплава (ВЭС) — с числом химических элементов в составе не менее 5 при приблизительно одинаковой их процентной концентрации, ср. [16,17].

В нашем случае акцент сделан на возможности управления функциональными характеристиками таких структур при температурных фазовых превращениях с изменением симметрии кристаллических решеток [18,19]. Мы кратко их здесь обсудим в лазерно-термодинамическом аспекте с различными режимами последовательных, конкурентных для многоимпульсного лазерного излучения, процессов нагревания и охлаждения материала из нержавеющей стали при лазерном воздействии на нее в окружающей образцы атмосфере.

Основным предметом исследований в настоящей статье является экспериментально обнаруженная явная зависимость электрофизических характеристик — вольт-амперных характеристик (ВАХ) — от конфигурации лазерно-индуцированной топологии на поверхности нержавеющей стали, возникающей при разных режимах лазерной абляции.

2. Методы и подходы — базовые физические принципы

2.1. Термодинамические фазовые трансформации при лазерном воздействии на твердую поверхность

Процесс лазерной абляции состоит в том, что образовавшаяся при лазерном плавлении жидкая фаза выбрасывается с поверхности, аналогично процессу высоко-

эффективного газодинамического испарения. Это нестационарный гидродинамический процесс с определенной скоростью движения границы фазового перехода твердое тело → жидкость, которая может демонстрировать взрывного характера экспоненциальный рост (ср. [8,20]), сопровождающийся деформацией поверхности с учетом давления отдачи и формированием кратера в ванне расплава.

В термодинамическом аспекте, подобные явления можно отнести к специфическому разделу термодинамики сложных систем, рассматривающему фазовые превращения в условиях реализации нелинейных неравновесных процессов (ср., например, [20]). Однако мы рассмотрим только сам факт управляемого образования и регистрации неоднородных топологических структур дендритного типа на поверхности нержавеющей стали в лазерном эксперименте.

При образовании ванны расплава при лазерном воздействии нас здесь будет интересовать формирование разной ориентации дендритных объектов с фрактальной структурой на поверхности мишени в результате произошедшей неоднородной по пространству лазерной абляции при последовательном лазерном нагревании и последующим охлаждением среды (ср. [13,15]). Необходимо также учесть взаимодействие падающего лазерного излучения с веществом при его выбросе при абляции. Возникающие при этом мелкоигльчатые структуры (с наличием мартенсита и остаточного аустенита, по аналогии с кристаллографическими фазовыми модификациями металлов) [16–18] определяются неравновесными скоростями нагрева и охлаждения в зависимости от режимов лазерного облучения, при неоднородности процесса кристаллизации по поверхности материала (ср. [20,21]).

2.2. Особенности лазерного воздействия на ВЭС-систему

Приведенные выше рассуждения относились к однородному по элементному химическому составу материалу, тогда как для ВЭС необходимо проводить комплексный анализ с учетом эффектов термодиффузии для разных компонент сплава, а также учитывать, что максимум температуры лазерного нагрева смещается в менее теплопроводящий материал, и в тем большей степени, чем больше длительность лазерного импульса [20].

В этом аспекте синтез тонкослойных поверхностных структур микро/наноразмера на поверхности твердого тела представляет особый интерес, и здесь имеется отдельная область исследований с дендритными структурами. По данному направлению лазерное воздействие на мишень в процессе лазерной абляции с последующим осаждением на ее поверхность продуктов абляции с управляемым получением заданной по конфигурации топологии определенного масштаба уже привело к ряду значительных результатов (см., например, [6,14]).

Механизм такого воздействия с реализацией топологических фазовых переходов в данных задачах основывается на теплофизических процессах при лазерном облучении образцов, и поэтому термодинамика таких процессов является ключевой для исследования модификации требуемых функциональных характеристик, в частности, электрических. При этом важна последовательность воздействия лазерными импульсами с разными параметрами с определенной задержкой между ними в зависимости от материальных параметров среды и ее окружения. Это связано с эффектами предварительного подплавления с последующей термодиффузией частиц разных элементов, и в результате — формированием на поверхности материала дендритов с регулируемой конфигурацией (ср. [13–15]).

Для рассматриваемых синтезированных структурных конфигураций заданного типа на поверхности твердого тела в условиях лазерного эксперимента можно говорить о специфической области термодинамики — лазерной термодинамике [5,22]. Речь идет о процессах, когда регулируемым образом при разных режимах лазерного воздействия на поверхность твердого тела с варьированием характеристик лазерного излучения (подбираемых его энергетических и временных параметров) в результате неравновесных термодинамических процессов оказывается возможным индуцировать различные фазовые состояния среды в приповерхностных слоях. При этом принципиально, что локальная температура для неоднородных областей дендритного/фрактального типа может существенно отличаться от средней температуры нагрева образца, что приводит к локальному плавлению материала в этих областях при воздействии на среду даже относительно слабого по энергии лазерного излучения (ср. [6]).

Мы для простоты и определенности использовали двухимпульсную лазерную абляцию для получения дендритов в тонких слоях на поверхности подложки-мишени толщиной 1 мм из нержавеющей стали AISI 304 со следующим составом химических элементов (в массовых процентах): С — до 0.08; Cr — 17.5–20; Fe — 66.345–74; Mn — до 2; Ni — 8–11; P — до 0.045; S — до 0.03; Cu — до 1 [13,15,23].

С этим материалом нами проводился ряд экспериментов при двухимпульсном воздействии в модели М-импульса с выбираемой длительностью (ср. [11]). Первый лазерный импульс реализовывал в области воздействия лазерного пучка режим предплавления вещества, наряду с которым происходила окислительная деструкция при медленном самопроизвольном охлаждении в интервале температур от ~ 1860 (оценка начала плавления одной фазы) до 1067 К (начало последующего фазового превращения) [16,17] по окончании воздействия лазерного импульса. Данный эффект аналогичен процессу межкристаллитной коррозии нержавеющей стали (ср. [16,17,24]). Однако прямые измерения в реальном масштабе времени возможны по яркостной температуре по оригинальной методике с применением

дополнительного лазерного монитора (см. [5]), которую мы использовали в других наших экспериментах при лазерно-индуцированном синтезе аллотропной фазы углерода — карбина, в углеродосодержащем материале [9].

Второй лазерный импульс в этом двухимпульсном формате создавал кристаллическую структуру дендритов в условиях происходящего естественного охлаждения из-за сдвига по времени между двумя воздействиями лазерного излучения на поверхность образца и формировал управляемым образом конечную конфигурацию дендритов. Их структура и особенности происходящего нелинейного неравновесного термодинамического процесса определялись длительностью и скоростью охлаждения, которые регулировались при выборе параметров второго лазерного импульса, по окончании действия которого происходит быстрое охлаждение среды [13,15,20].

Проведенные нами исследования термофизического процесса в данной схеме двухимпульсного лазерного воздействия на материал при общем времени воздействия с длительностями лазерного импульса от 1 до 6 ms, и при соответствующей плотности потока энергии облучения от 3.3 до $0.5 \cdot 10^6$ J/m²/s привели к зависимости температуры на облучаемой нержавеющей стали в диапазоне изменения температуры, соответственно, от 335 до 1215 °С. Приведенные цифровые значения получены нами при моделировании распределения поля температур на подложке из нержавеющей стали в условиях параболического закона роста температуры при лазерном облучении мишени.

В более общем случае с достижением разных термодинамических режимов процесс можно реализовать при воздействии последовательности лазерных импульсов с выбираемыми их параметрами (см., например, [5]).

Не останавливаясь на используемой нами модели для анализа [13], отметим только, что в результате лазерного нагрева происходит увеличение энтропии (ср. [25]), которая в данном случае комплексных соединений представляет собой энтропию смешения, и реализуется синтез керамического ВЭС-перовскита с определенными концентрациями компонент. Это обеспечивается подбором температуры нагрева и длительности между двумя импульсами в данном случае для нержавеющей стали после процесса ее окислительной деструкции, происходящей, например, в атмосфере воздуха. Но, с другой стороны, быстрое охлаждение по окончании воздействия второго лазерного импульса приводит к возникновению термодинамических состояний с химическими превращениями, среди продуктов которых присутствует мартенсит с формированием конфигураций дендритов. Это является возможным, т.к. образование мартенсита для нержавеющей стали происходит, как известно, в широком диапазоне температур (при переохлаждении ее поверхности от ~ 900 °С до комнатной температуры) [16,17].

Принципиальная возможность реализации управления топологией дендритов и их элементным составом обес-

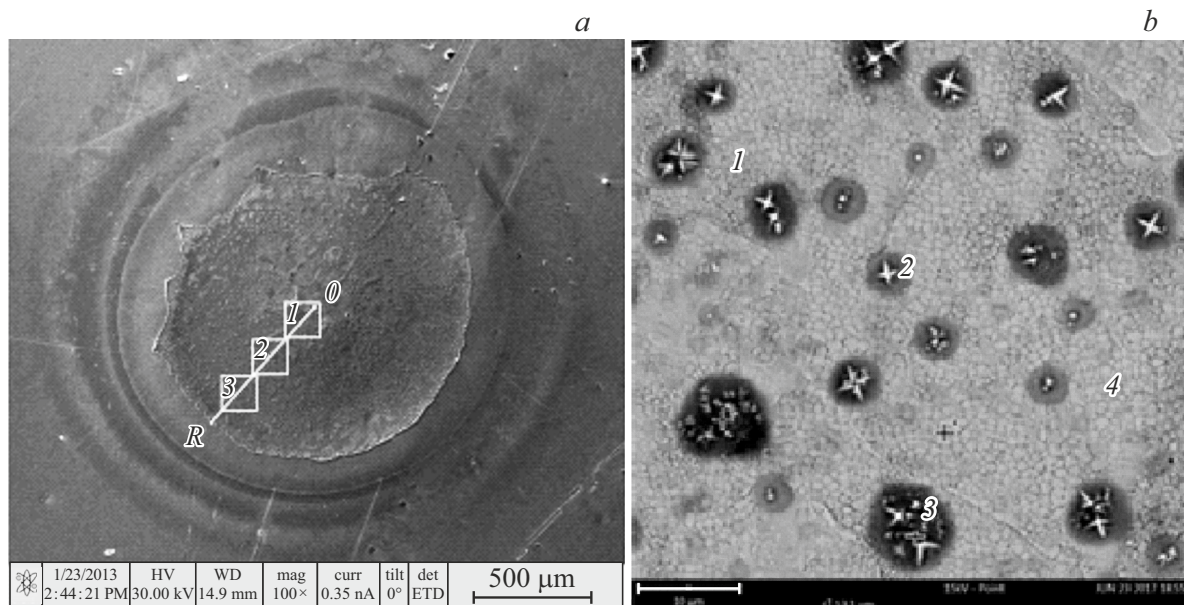


Рис. 1. *a)* Область лазерного воздействия при М-импульсе. Показаны три зоны 1–3, от центра сфокусированного лазерного пучка (зона 0) и до периферии (зона R) лазерного пучка при его воздействии на поверхность. *b)* РЭМ-изображение зоны 2 с расположением дендритов на ее поверхности (цифрами обозначены точки).

печивается выбором соответствующих характеристик воздействия в лазерном эксперименте.

3. Результаты по конфигурациям лазерно-индуцированных поверхностных структур при теплофизических процессах и обсуждение

3.1. Синтез микро/нанодендритов на поверхности нержавеющей стали AISI 304

В нашем случае было использовано лазерное воздействие в атмосфере воздуха на предварительно очищенную поверхность нержавеющей стали со следующими параметрами в лазерном эксперименте: излучение Nd:YAG-лазера (типа CLW-50CTM) с длиной волны излучения $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$; двухимпульсный режим реализовывался в виде М-образного импульса с интервалами между его двумя фрагментами 3 ms; энергия в импульсе выбиралась нами величиной 10 или 12 J; общая длительность такого комбинированного лазерного импульса имела значение τ от ~ 6 до 12 ms с шагом 2 ms; диаметр светового пятна в фокусе лазерного излучения на образце $\sim 1 \text{ mm}$. Это приводило к появлению на образце модифицированного слоя толщиной $\sim 20 \text{ nm}$ с образованием дендритов при температуре нагрева поверхности нержавеющей стали до 1860 K — по оценке согласно параболическому закону окисдации (ср. [13,14,23]). По физике происходящих явлений при лазерной абляции

поверхности мишени принципиальное значение имеет не столько ее исходное состояние, а выбираемый режим абляции и структура мишени после абляции, в том числе и с учетом процессов обратного осаждения ее фрагментов на поверхность. Это и определяет параметры возникающих дендритов.

Образующиеся на поверхности образца в зонах лазерного воздействия каверны размером $1 \times 1 \text{ mm}$ сначала регистрировались на оптическом цифровом микроскопе с выявлением цветов побежалости, свидетельствующих о наличии оксидной пленки на поверхности материала. Затем при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) была обнаружена область распространения самих дендритов, которые находились, в том числе, и в показанных на рис. 1 областях 1 и 3. Они были равномерно распределены, в частности, в области 2 каверны (она отдельно показана на рис. 1, *b*).

Кроме того, были определены также размеры дендритов, при помощи атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 2). Оценка этих параметров приводит к следующим средним значениям: диаметр окружности, описанной вокруг основания дендрита — $2.7 \mu\text{m}$, высота дендрита — $1.7 \mu\text{m}$.

По результатам проведенного энергодисперсионного анализа было обнаружено, что в не обработанных лазерным излучением областях преобладает железо, как и в областях между дендритами. В расположении одиночных дендритов или их скоплений процентное содержание компонент для данной марки нержавеющей стали после лазерного воздействия почти выравнивалось (см. табл. 1 с номерами обозначенных на рис. 1, *b* точек).

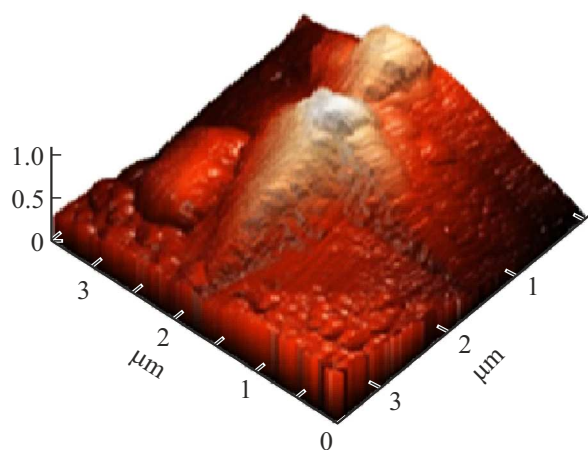


Рис. 2. Параметры одиночного дендрита на АСМ-изображении.

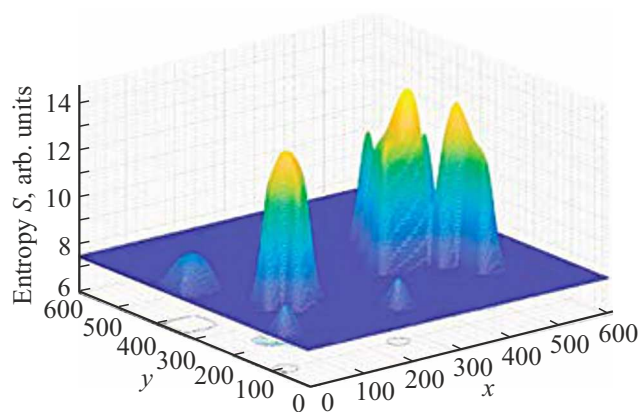


Рис. 3. Расчетное распределение энтропии смешения S_{diff} по поверхности образца в зоне 3 на рис. 1, а.

Таблица 1. Значения концентраций элементов, усредненные по 20 различным измерениям областей в разных образцах стали AISI 304 в фиксированных точках 1–4 на поверхности образца после лазерного воздействия

№ точки	Доля химического элемента, %						
	Fe	Cr	O	Ni	Mn	C	Σ
1	63.2	16.7	8.6	7.8	2.2	1.5	100
2	19.0	24.8	32.6	1.3	20.6	1.7	100
3	41.1	18.1	26.2	4.7	8.8	1.1	100
4	69.4	18.0	0	9.7	1.7	1.2	100

Точка 3 в табл. 1 определяет область, в которой находится скопление дендритов на поверхности нержавеющей стали.

Был также проведен расчет значения энтропии смешения S_{diff} для такого состава элементов в предположении адиабатического процесса, по методике, изложенной

в [15] для обозначенных параметров лазерного термодинамического процесса. Область скопления дендритов соответствует максимальной энтропии смешения компонент элементов в образце. Расчетное распределение энтропии смешения S_{diff} в одной из зон на поверхности образца показано на рис. 3. Это позволяет сделать вывод, что на поверхности образца под оксидной пленкой находится высокоэнтропийный сплав с дефектами (ср. [15]).

Исследование термодинамических условий получения таких структур и проведенный нами анализ продемонстрировали, что на начальном этапе лазерного воздействия возможен синтез структуры с наличием неоднородностей и дефектов с многоэлементным химическим составом типа высокоэнтропийного перовскита (с процентным содержанием поэлементно в нашем случае: $\sim 9\%$ — C, $\sim 14\%$ — Cr, $\sim 9\%$ — Fe, $\sim 11\%$ — Mn, $\sim 11\%$ — Ni, $\sim 46\%$ — O). При этом термодинамические этапы происходящих процессов при лазерном воздействии сводились, в терминах фазовых переходов (ср. [26]), к следующей последовательности: из нержавеющей стали образуется высокоэнтропийный перовскит, а из него — мартенсит. Это утверждение сделано нами на основе использования результатов работы [26] с учетом наших собственных исследований динамических неустойчивостей при лазерной абляции образца.

3.2. КР-спектр дендритов на поверхности нержавеющей стали AISI 304

Ниже представлен один пример из характерных измеренных нами спектров комбинационного рассеяния (КР) в обратных сантиметрах с интенсивностью в единицах фотоотсчетов для поверхностей ряда образцов из нержавеющей стали AISI 304 с дендритами (для краткости показан только один из них — рис. 4: они практически идентичны для исследованных нами образцов). Конфигурации дендритов получены при приведенных в предыдущем пункте параметров лазерного воздействия. Данные спектры сравнивались нами с КР-

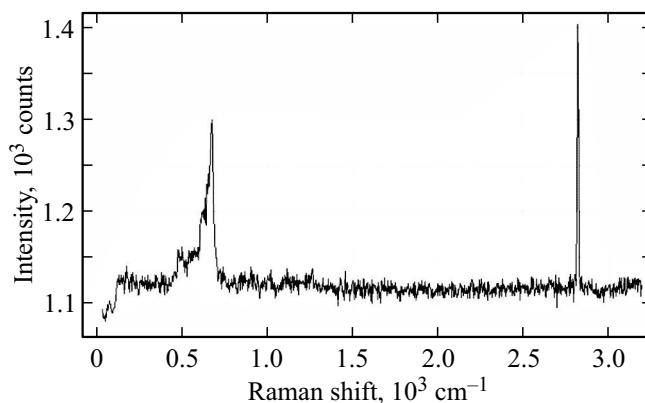


Рис. 4. КР-спектр, полученный на одном из образцов нержавеющей стали AISI 304 с лазерно-синтезированными дендритами на поверхности твердого образца.

спектрами биксбиита — $(\text{Fe}-\text{Fe}_2\text{O}_3)$ из базы данных RRUFF [27], и показали хорошее совпадение. При этом измеренные спектры содержат ряд разных линий вращательных и колебательных резонансов, форма и характеристики которых зависят от размеров поверхностных неоднородностей — микро/наночастиц.

Из рис. 4 видно, что сильные рамановские пики (500 и 700 см^{-1}) соответствуют наличию вещества Fe_2O_3 (ср. [28]). При этом профили поверхности (например, вдоль оси OX , рис. 3) у разных образцов имели схожий рельеф. Такие пики на спектрах наблюдались во всех образцах. Исходя из этого, можно считать, что помимо фазового превращения перовскита в мартенсит, одновременно с этим образовывалась окись железа на поверхности дендрита, из-за того, что углерод в мартенсите испарился из решетки мартенсита (ср. [29]).

В оксидной пленке, образующейся на поверхности дендрита в процессе окислительно-восстановительной реакции, кислород может появиться из окисного слоя на мишени или из кислорода воздуха. Что касается отсутствия атомов марганца, хрома, никеля в спектре рис. 4, если отвлечься от его колебательного характера, то можно предположить их диффузию внутрь подложки, а углерод из молекул CO_2 , вероятно, поступает в образец непосредственно из атмосферного воздуха. Еще раз отметим, что в зависимости от режима лазерной абляции (энергетических параметров воздействующих лазерных импульсов и пучков) реализуется определенная глубина модификации поверхности мишени.

Средствами конфокальной микроскопии с использованием измерений рис. 4 можно воссоздать отсканированную поверхность образца. Тогда наиболее интенсивные пики, соответствующие Fe_2O_3 , будут также определяться областями расположения дендритов вдоль поверхности подложки. Таким образом, действительно, можно заключить, что дендриты по химическому составу состоят из системы Fe_2O_3 .

Отдельный интерес представляет оценка фрактальной размерности таких дендритных объектов. Далее мы приведем кратко эти результаты по аналогичным измерениям, проведенным нами и в экспериментах с хромисто-ванадиевой сталью по той же методике двухимпульсной абляции ее поверхности.

3.3. Оценка фрактальной размерности в экспериментах с хромисто-ванадиевым типом нержавеющей стали

Для хромисто-ванадиевой нержавеющей стали ее химический состав с синтезируемыми в нашем эксперименте при лазерном воздействии дендритами представлен в табл. 2.

Структура полученной поверхности в лазерно-образованной каверне после такого лазерного воздействия, зарегистрированная оптическим микроскопом МКИ-2М-1, показана на рис. 5 и демонстрирует, что

Таблица 2. Химический состав дендритов для хромисто-ванадиевой нержавеющей стали

Элемент	Процентное содержание, %
Fe	81.9
Mn	0.3
V	0.2
Cu	0.1
Cr	17.0
Ti	0.2
Ni	0.1
C	0.2

на поверхности действительно находятся дендритные объекты.

Результаты расчета фрактальной размерности для различных входных параметров лазерного эксперимента с нержавеющей хромистой сталью представлены ниже на рис. 6, *a* для области на изображении поверхностной структуры, показанной на рис. 6, *b*. При этом использовалась процедура расчета (см. [30]) в формате, указанном на рис. 6, *c*.

Получено, что при двухимпульсной абляции в формате зависимости (E, t) , где E — энергия лазерного излучения, t — длительность его импульса, для образовавшихся дендритов в ряде различных по составу подложек из нержавеющей стали фрактальная размерность в среднем составляла одинаковую величину, равную 1.9.

Можно утверждать, что на основе реализации разных значений фрактальной размерности при лазерном воздействии оказывается возможным заданное управление конфигурацией возникающих дендритов и определение функциональных физических характеристик получаемых локально неоднородных твердотельных объектов.

4. Электрофизика синтезированных в лазерном эксперименте дендритных структур на поверхности образца — ВАХ

Для исследования электрофизических свойств рассматриваемых поверхностей с лазерно-синтезированными дендритами регистрировались их ВАХ. Измерительные микроконтакты с подводом к ним электрического напряжения помещались на образцы в разных точках поверхности с соответствующим сканированием по ней между выбираемыми локальными областями с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) NTEGRA-Aura, производства компании НТ-МДТ, в режиме постоянного тока при нормальных внешних условиях ($T = 295\text{ К}$) в естественной среде. Можно, вероятно,

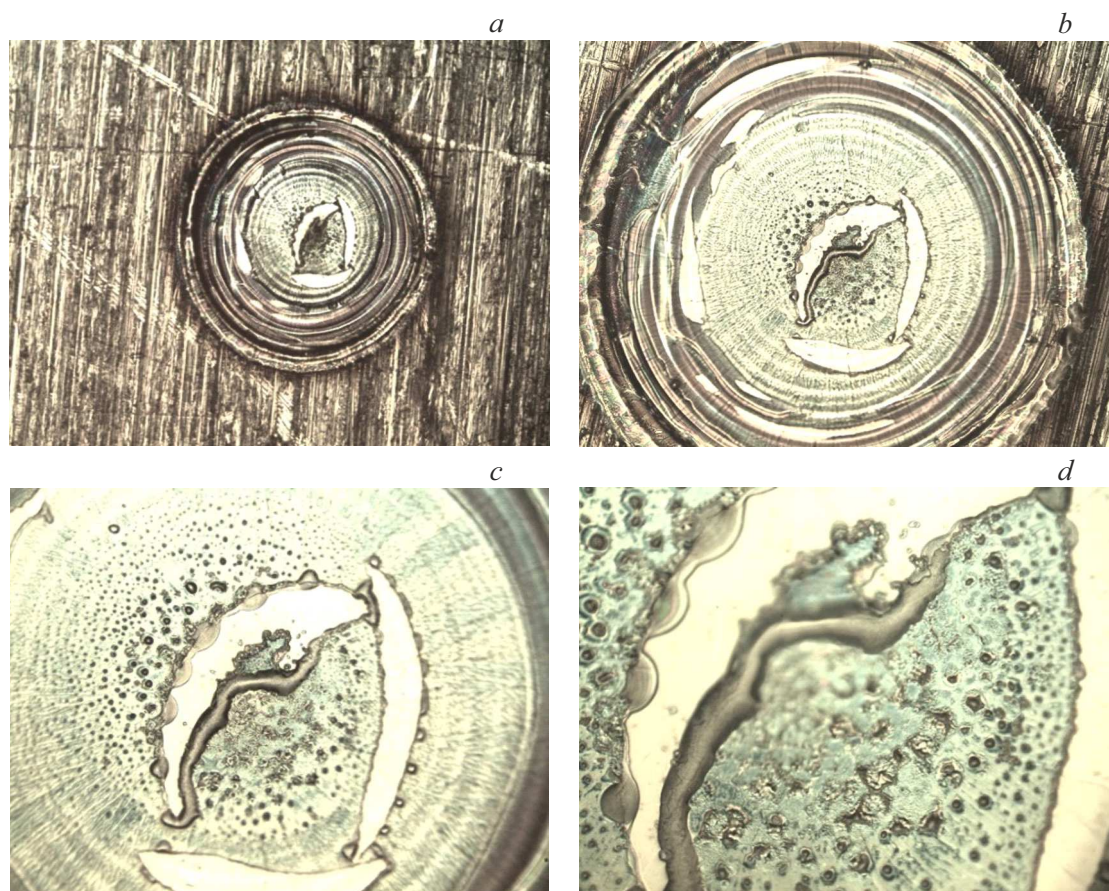


Рис. 5. Оптическая микроскопия лазерно-индуцированной дендритной структуры в каверне на поверхности нержавеющей хромисто-ванадиевой стали с разным увеличением: а) $\times 125$; б) $\times 250$; в) $\times 500$; д) $\times 1000$.

полагать, что между иглой туннельного микроскопа как микроконтакта на поверхности образца и самим образцом, к которому прикладывается второй микроконтакт, туннелирование электронов происходит в нашем случае в вакууме. ВАХ снимались в диапазоне от $+1$ до -1 В. Измерения усреднялись по 200 полученным данным за одну секунду в каждой точке. Для выбираемого набора параметров лазерной обработки поверхности для исследуемой нами стали анализ выполнялся с выбором не менее 100 точек на поверхности с последующей статистической обработкой данных. Результаты обрабатывались автоматически при помощи соответствующего программного обеспечения.

На рис. 7 изображена схема измерения ВАХ. Образец с дендритной структурой в кавернах после лазерного воздействия помещался на движущийся оптический столик с заданным программным управлением его движения с соответствующей обратной связью (return coupling, RC), а электронапряжение подавалось в цепи между фиксированным положением микроконтакта-иглы СТМ и самим образцом, перемещающимся по определенному алгоритму движения. Это позволяло выполнять измерения в локальных областях с выбираемой их фрагментарно дендритно-кластерной структурой.

Измерения ВАХ выполнялись для восьми каверн, образованных после лазерного воздействия с различными параметрами. Каждая точка на зависимости ВАХ соответствует своему условию возникновения дендритов по энергии и длительности воздействующего на поверхность образца излучения лазерного импульса.

Приведенные ниже результаты для ВАХ определяют полученной в эксперименте при лазерном воздействии на образец картой высот дендритов со значениями высот по вертикали (ось OZ) до $1\text{ }\mu\text{m}$. Сами дендриты в данной матрице дендритов на поверхности образца регистрировались с использованием СТМ в области сканирования по поверхности (оси X, Y) размером до 1 mm с шагом подачи электрического напряжения между контактным зондом и смещающейся поверхностью образца в $1\text{ }\mu\text{m}$ (100 точек).

Все полученные ВАХ демонстрировали явно выраженное отклонение от омического поведения. На рис. 8 представлены графики ВАХ, отображающие зависимости при изменении длительности лазерного импульса при фиксированной энергии лазерного воздействия. Видно, что прослеживается тенденция по изменению угла наклона кривой зависимости ВАХ в меньшую сторону при большей длительности лазерного воздействия. Это

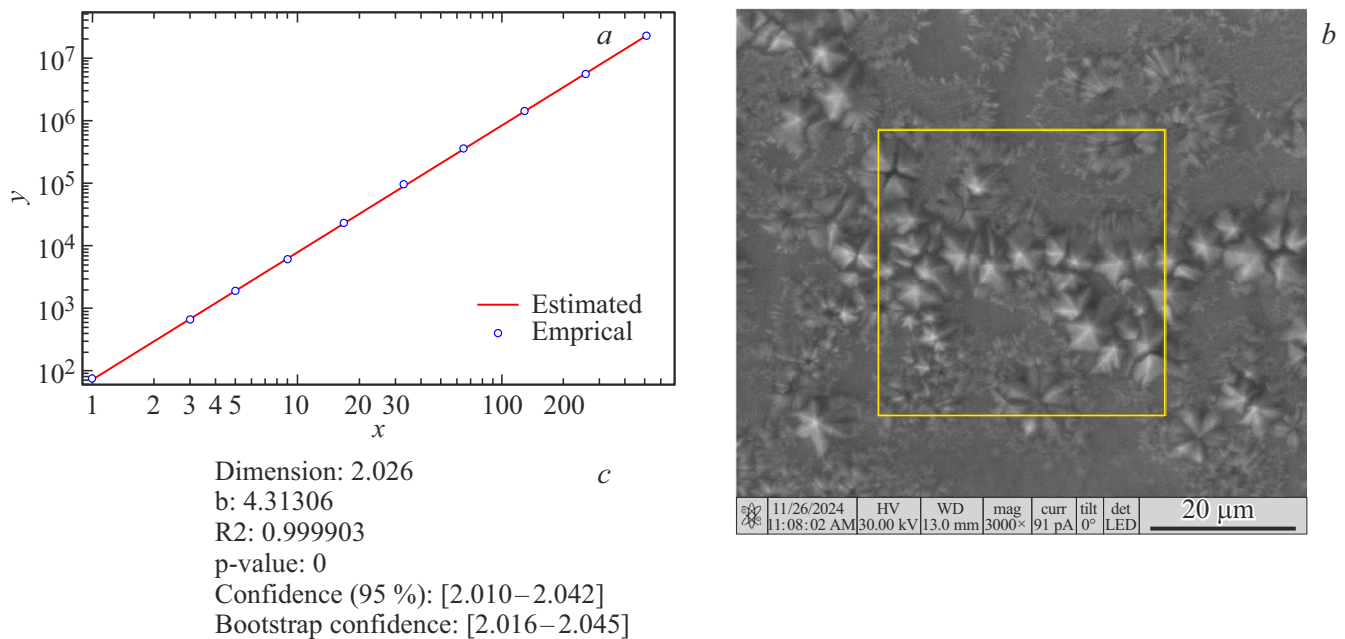


Рис. 6. Условия и результаты расчета фрактальной размерности для хромисто-ванадиевой стали после лазерного воздействия. а) Эмпирическая кривая показана кружками, а расчетная модель (регрессионная кривая) — красной линией. б) РЭМ-изображение поверхности хромисто-ванадиевой стали: квадратом выделена расчетная область фракталов. в) Окно с численными результатами, где обозначены: „Dimension“ — фрактальная размерность, „b“ — параметр сдвига в выбранной модели с пространственными координатами ($\log y = D \log x + b$), „R2“ — коэффициент детерминации регрессии, „p-value“ — значимость регрессии (д.б. ниже 0.001), „Confidence“ — доверительный интервал, „Bootstrap confidence“ — доверительный интервал в результате самонастройки ки регрессии.

может говорить о том, что происходит увеличение оксидной пленки на поверхности образца, которая приводит к увеличению значения электросопротивления. Кроме того, видно, что значение токов при лазерной энергии воздействия 12 J для образовавшихся на поверхности дендритов имеют величину выше, чем для дендритов, полученных при лазерной энергии 10 J.

В эксперименте было также получено, что при постоянной длительности лазерного импульса и увеличении энергии лазерного излучения зависимость ВАХ демонстрирует уменьшение электросопротивления та-

ких дендритных структур. Эта тенденция оставалась постоянной независимо от длительности лазерного импульса (рис. 8), но при этом меняется только угол наклона для измеряемой зависимости величины тока при определенном напряжении, т.е. изменяется значение дифференциального сопротивления.

В рассматриваемых нами неоднородных структурах связь между напряжением и током описывается нелинейной ВАХ, т.е. электросопротивление элемента не является постоянной величиной. На основе ВАХ для каждой точки нами были рассчитаны статическое и дифференциальное сопротивление, где статическое сопротивление представляет собой отношение напряжения к току в конкретной точке, а дифференциальное сопротивление определяется отношением малого приращения напряжения к малому приращению тока в выбранной точке, и оно может иметь отрицательное значение при нелинейной зависимости ВАХ; это проявляется в твердотельной электротехнике в диодных системах разного типа.

В табл. 3 приведены расчетные вариации максимального и минимального значений статического и дифференциального сопротивления на поверхности образца с дендритными структурами в разных локальных областях карты их распределения по поверхности образца, сформированных при различных параметрах лазерного воздействия.

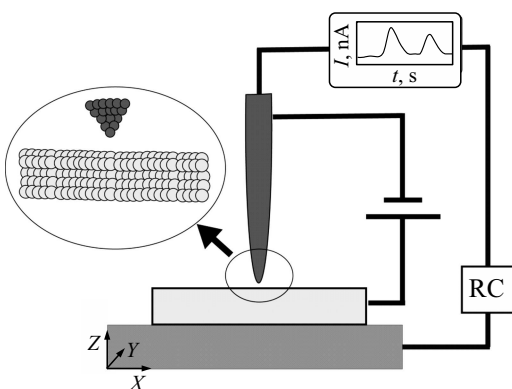


Рис. 7. Схематическое изображение измерений ВАХ с помощью СТМ (пояснения даны в тексте).

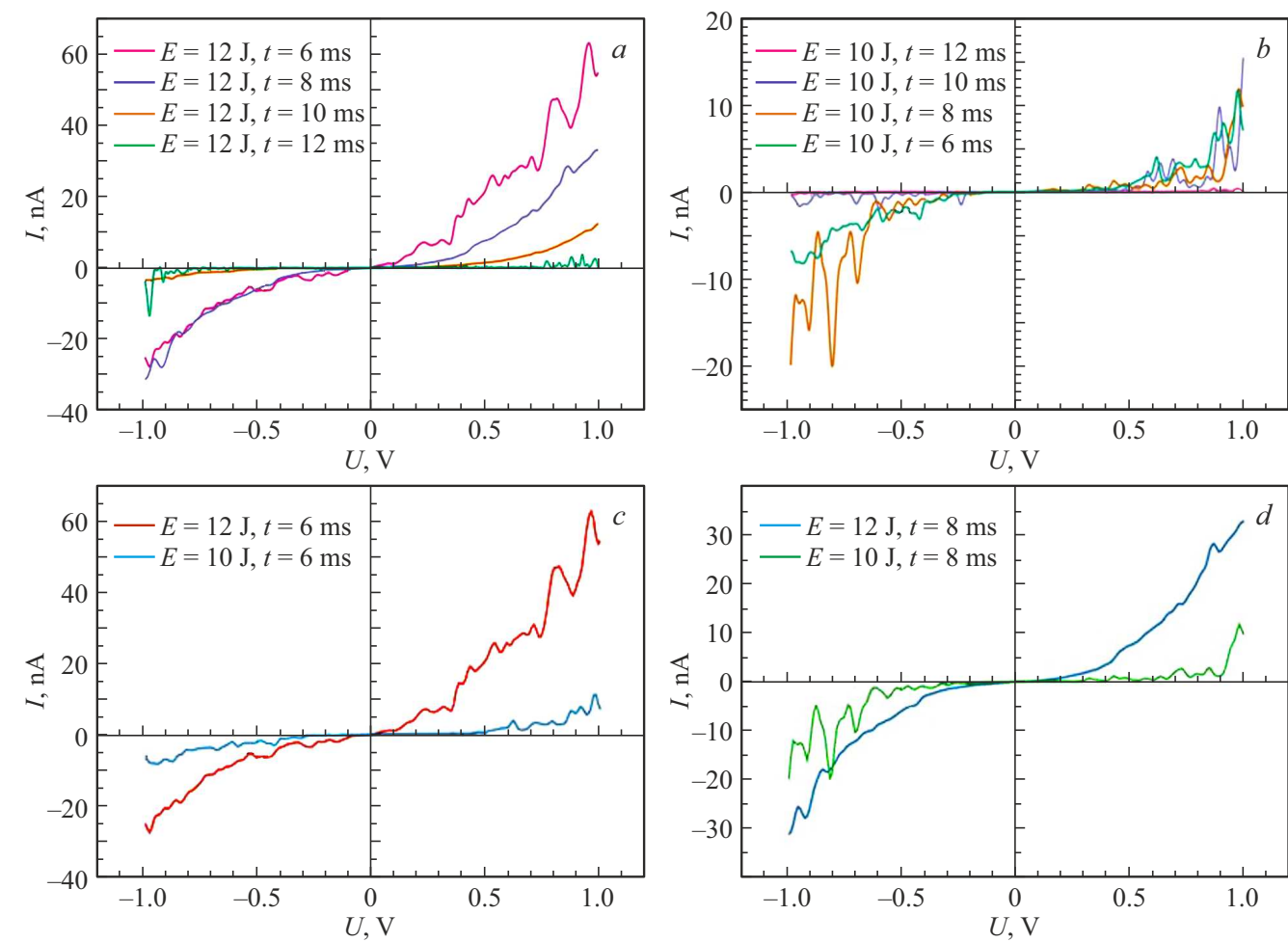


Рис. 8. График зависимости ВАХ дендритных микроструктур, образовавшихся при постоянной энергии воздействующего лазерного излучения, равной для разных случаев 12 и 10 J, и указанных разных длительностях лазерных импульсов t (отмечено разным цветом): а) при $t = 6$ ms; б) при $t = 8$ ms; в) при $t = 10$ ms; д) при $t = 12$ ms.

Таблица 3. Расчетные максимальные и минимальные значения статистического сопротивления R_{stat} и дифференциального сопротивления r_{diff} для энергии лазерного импульса E длительности t . Приведены данные для максимального тока I_{max}

E , J	t , ms	I_{max} , mA	$R_{\text{stat, min}}$, MΩ	$R_{\text{stat, max}}$, MΩ	$r_{\text{diff, min}}$, MΩ	$r_{\text{diff, max}}$, MΩ
12	6	66.94	15.0	970	−3.5	+1.7
12	8	33.41	29.7	750	−1.2	+2.2
12	10	12.78	78.2	1000	−2.5	+3.0
12	12	3.65	300.5	6000	−5.1	+5.1
10	6	15.14	65.8	600	−4.1	+4.1
10	8	16.57	60.3	900	−3.9	+6.0
10	10	20.76	48.2	800	−4.0	+2.7
10	12	0.45	2200	40000	−39.6	+1.5

Значение I_{max} выбиралось как наибольшее среди всех измеренных в локальных областях/точках на дендритной поверхности значений тока при разных напряжениях. Соответствующее напряжение бралось из того же массива данных по точкам поверхности, что и максимальный ток.

В частности, при лазерной энергии облучения поверхности 12 J наблюдается наименьшее статическое сопротивление порядка 15 MΩ при короткой длительности лазерного импульса 6 ms. Но, например, при $t = 12$ ms и той же лазерной энергии 12 J сопротивление возрастает до 6000 MΩ, то есть поверхность образца становится практически не проводящей.

При лазерной энергии, равной 10 J, и длительности лазерного импульса 12 ms реализуется наибольшее статическое сопротивление — до 40 GΩ, а также наибольшее отрицательное дифференциальное сопротивление, −39.6 MΩ. Но при уменьшении длительности импульса уменьшается и сопротивление локальных областей с дендритами.

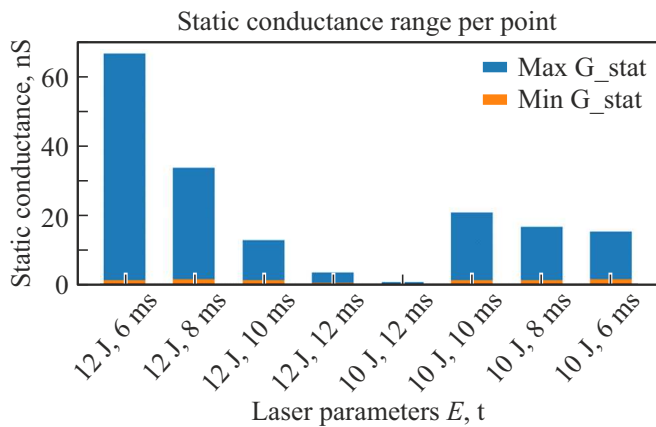


Рис. 9. Диаграмма изменения статической электропроводности в зависимости от указанных на оси абсцисс параметров лазерного излучения (энергии E и длительности лазерных импульсов t).

Это дает возможность управления данными электрофизическими характеристиками в соответствующих задачах для различных приложений.

Параметры лазерного воздействия на образец, такие как энергия импульса и его длительность, определяют фундаментальные свойства электропроводности образовавшихся на поверхности образца конфигураций дендритных структур. Так, при увеличении длительности лазерного импульса при энергии, равной 12 J, статическая электропроводность падает от значения максимального уровня в 66.7 nS при длительности воздействующего лазерного импульса $t = 6$ ms до значения 3.3 nS при длительности лазерного импульса $t = 12$ ms. Уменьшение энергии до 10 J приводит к существенному снижению электропроводности — при $t = 12$ ms до значения менее 2 nS. Однако с уменьшением длительности лазерного импульса наблюдается небольшое увеличение электропроводности — в пределах 1.11–1.52 nS.

Соответствующая диаграмма изменений статической электропроводности, полученная по нашим данным, показана на рис. 9.

Таким образом, нами продемонстрирована возможность контролируемого изменения карты электропроводности на поверхности твердого образца, для синтезируемых в лазерном эксперименте поверхностных дендритных структур различной конфигурации. Это позволяет находить требуемые в электрофизике схематические решения и может быть использовано, например, для разработки на новых физических принципах поверхностной твердотельной микро/нанoeлектроники следующего поколения на основе лазерно-формируемых топологических структур заданной конфигурации.

Следует особо подчеркнуть, что сами значения локальных электрических полей в пиках дендритных структур могут на порядки величин превышать их значения для массивных образцов того же химического состава

(ср. [6]), поэтому управление конкретной конфигурацией дендритов и формой их вершин играет принципиальную роль и может регулироваться именно требуемым образом в лазерном эксперименте с учетом поперечного сечения используемого микроконтакта.

Подтверждением этому служат результаты, полученные в наших экспериментах для нескольких твердотельных материалов (ср. [5,30]).

При разных скоростях нагрева и охлаждения материала в лазерном эксперименте поведение топологического геометрического дендритного параметра α , определяющего расстояние между дендритами по поверхности, для разных материалов сильно отличается. При этом в эксперименте достигается резкое уменьшение величины α (в десятки раз) при выбранной скорости неравновесного охлаждения, и/или реализуется практически плато для параметра α в разных условиях лазерного воздействия (ср. [14,31]). Это, во-первых, является процедурой получения топологических изоляторов со структурами микро/наномасштаба, а во-вторых, может служить примером электросхематических решений в электрофизике подобных лазерно-синтезированных структур разного элементного состава.

Особое значение здесь имеет изменяемая в зависимости от топологии поверхности твердого образца структура электронных состояний и взаимосвязь зарядовых носителей — электронов. Их определенные модифицируемые квантовые состояния могут приводить к сверхпроводимости (ср. [32]), в частности, у широкого класса металлоуглеродных и алмазоподобных соединений (ср. [6]).

5. Заключение

Проведены экспериментальные исследования и выполнено моделирование фрактальных структур по синтезируемому на поверхности твердого тела топологическим микро/наноструктурам с дендритами с их управляемой конфигурацией в лазерном эксперименте для образцов из нержавеющей стали AISI 304. Она может быть представлена как пример высокоэнтропийного соединения с процентным составом элементов, зависящим от прилаемого лазерного воздействия. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния определен элементный состав синтезированных поверхностных структур и проведена оценка значений энтропии смешения для исследуемой среды в разных условиях. При этом физика происходящих явлений может быть представлена как неравновесная лазерная термодинамика для твердого тела.

Показано, что в экспериментах с двухимпульсной лазерной абляцией для исследованных образцов различного типа при разных режимах воздействия лазерным излучением с определенной энергией в импульсе и его длительностью фрактальная размерность образующихся высокоэнтропийных дендритов составляет в среднем

величину около 1.9 и может регулироваться в требуемых диапазонах.

Для электрофизики в подобных конфигурациях дендритных структур получены экспериментальные зависимости для вольт-амперных характеристик (ВАХ) с использованием ближнеполевой туннельной микроскопии с регистрацией изображений карты структур, синтезированных на поверхности твердотельного образца. Продemonстрировано, что электрическое сопротивление, электропроводность и ВАХ зависят от нескольких факторов: от размера образующихся фрактальных структур, их расположения на поверхности и от химического состава высокоэнтропийного сплава, меняющегося при лазерном воздействии, а также и от степени шероховатости поверхности твердотельной подложки-мишени в эксперименте. Это определяет ряд теплофизических фазовых превращений, индуцируемых в таких топологических объектах под действием лазерного излучения, которые и влияют на функциональные характеристики исследуемых объектов. При этом возможна высокая локальная электропроводность в определенных областях на поверхности с лазерно-синтезированными дендритами для такого рода топологических фазовых состояний с управляемыми нелинейными характеристиками при комнатной температуре окружения.

Такие синтезированные регулируемым образом в лазерном эксперименте дендритно-фрактальные структуры высокоэнтропийных сплавов с разными классами кристаллических решеток при фазовых превращениях имеют как фундаментальное, так и прикладное значение для разработки элементов и систем нанофотоники, микро- и наноэлектроники на новых физических принципах с использованием топологических поверхностных структур разных конфигураций.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.П. Пономаренко, В.С. Попов, С.В. Попов, Е.Л. Черпурнов. Успехи прикладной физики **7**, 1, 10 (2019). [V.P. Ponomarenko, V.S. Popov, S.V. Popov, E.L. Cherpurnov. Adv. Appl. Phys. **7**, 1, 10 (2019).]
- [2] В.Д. Окунев, З.А. Самойленко, Ю.М. Николаенко, Т.А. Дьяченко, В.В. Бурховецкий, А.С. Корнеевец. ФТТ **67**, 1, 90 (2025).
- [3] Е.Н. Мохов, С.С. Нагалюк, О.П. Казарова, С.И. Дорожкин, В.А. Солтамов. ФТТ **67**, 1, 114 (2025).
- [4] В.Ф. Гантмахер. Электроны в неупорядоченных средах. Физматлит, М. (2013). 288 с.
- [5] С.М. Аракелян, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, В.Г. Рау, А.Г. Сергеев. Введение в фемтонанопотонику. Фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов / Под ред. С.М. Аракеляна. Логос, М. (2020). 744 с.
- [6] С.В. Гарнов, Д.В. Абрамов, Д.Н. Бухаров, Т.А. Худайберганов, К.С. Хорьков, А.В. Осипов, С.В. Жирнова, А.О. Кучерик, С.М. Аракелян. УФН **194**, 2, 115 (2024). [S.V. Garnov, D.V. Abramov, D.N. Bukharov, T.A. Khudaiberganov, K.S. Khor'kov, A.V. Osipov, S.V. Zhirnova, A.O. Kucherik, S.M. Arakelyan. Phys. — Uspekhi **67**, 2, 109 (2024).]
- [7] И.А. Сухов, А.В. Симакин, Г.А. Шафеев, Г. Вье, С. Гарсиа. Квантовая электроника **42**, 5, 453 (2012). [I.A. Sukhov, A.V. Simakin, G.A. Shafeev, G. Viau, C. Garcia. Quantum Electronics **42**, 5, 453 (2012).]
- [8] G. Yang. Laser Ablation in Liquids. Jenny Stanford Publishing, New York (2012). 1192 p.
- [9] Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, А.Ф. Галкин, Л.Д. Квачева, И.И. Климовский, М.А. Кононов, Л.А. Михалицын, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, В.В. Савранский. Письма в ЖЭТФ **84**, 5, 315 (2006). [D.V. Abramov, S.M. Arakelyan, A.F. Galkin, L.D. Kvacheva, I.I. Klimovskii, M.A. Kononov, L.A. Mikhailitsyn, A.O. Kucherik, V.G. Prokoshev, V.V. Savranskii. JETP Lett. **84**, 5, 258 (2006).]
- [10] M.C. Downer, H. Ahn, D.H. Reitze, X.Y. Wang. Int. J. Thermophys **14**, 3, 361 (1993).
- [11] Н.А. Торхов. ФТП **53**, 1, 32 (2019). [N.A. Torkhov. Semiconductors **53**, 1, 28 (2019).]
- [12] З.Д. Квон, Д.А. Козлов, Е.Б. Ольшанецкий, Г.М. Гусев, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий. УФН **190**, 7, 673 (2020). [Z.D. Kvon, D.A. Kozlov, E.B. Olshanetsky, G.M. Gusev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky. Phys. — Uspekhi **63**, 7, 629 (2020).]
- [13] М.П. Алешин, Д.Д. Тумаркина, Е.С. Опарин, Д.Н. Бухаров, О.Я. Бутковский, С.М. Аракелян. ФММ **125**, 9, 1108 (2024). [M.P. Aleshin, D.D. Tumarkina, E.S. Oparin, D.N. Bukharov, O.Ya. Butkovsky, S.M. Arakelian. Phys. Metals. Metallogr. **125**, 9, 970 (2024).]
- [14] Д. Бухаров, Д. Тумаркина, А. Кучерик, А. Ткачев, С. Аракелян, И. Буркова, А. Бурakov. J. Adv. Mater. Technol. **9**, 3, 207 (2024).
- [15] Д.Д. Тумаркина, О.Я. Бутковский, А.В. Болачков, А.А. Бурцев. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов **15**, 869 (2023).
- [16] А.С. Рогачев. ФММ **121**, 8, 807 (2020). [A.S. Rogachev. Phys. Metals. Metallogr. **121**, 8, 733 (2020).]
- [17] А.Н. Мазничевски, Ю.Н. Гойхенберг, Р.В. Сприкут. ФММ **122**, 4, 388 (2021). [A.N. Maznichenkii, R.V. Sprikut, Y.N. Goikhenberg. Phys. Metals. Metallogr. **122**, 4, 362 (2021).]
- [18] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. Физматлит, М. (2005).
- [19] А.А. Абрикосов. Fundamentals of the theory of metals. Dover Publications, New York (2017).
- [20] В.В. Сычев. Сложные термодинамические системы, 5-е изд., доп. Изд. дом МЭИ, М. (2009). 296 с.
- [21] К.С. Хорьков, М.Ю. Звягин, Д.А. Кочуев, Р.В. Чкалов, С.М. Аракелян, В.Г. Прокошев. Изв. РАН. Сер. физ. **81**, 12, 1624 (2017). [K.S. Khorkov, M.Y. Zvyagin, D.A. Kochuev, R.V. Chkalov, S.M. Arakelian, V.G. Prokoshev. Bull. RAS. Phys. **81**, 12, 1433 (2017).]
- [22] W.W. Duley. J. Laser Appl. **17**, 1, 15 (2005).
- [23] Д.Н. Антонов, А.А. Бурцев, О.Я. Бутковский. ЖТФ **86**, 1, 110 (2016). [D.N. Antonov, A.A. Burtsev, O.Ya. Butkovskii. Tech. Phys. **61**, 1, 108 (2016).]

- [24] В.П. Дресвянский, А.В. Кузнецов, С. Энхбат, Е.Ф. Мартынович. Изв. РАН. Сер. Физ. **84**, 7, 982 (2020). [V.P. Dresvyansky, A.V. Kuznetsov, S. Enkbat, E.F. Martynovich, Bull. RAS. Phys. **84**, 7, 811 (2020).]
- [25] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Физическая кинетика. Физматлит, М. (2002). 536 с.
- [26] И.В. Беленькая, М.П. Попов, И.А. Старков, О.А. Савинская, С.Ф. Бычков, А.П. Немудрый. Химия в интересах устойчивого развития **22**, 4, 371 (2014).
- [27] Интегрированная база данных рамановских спектров RRUFF [Электронный ресурс]. URL: <https://rruff.info> (дата обращения 28.03.2025 г.).
- [28] S.M. Reda. Int. J. Nano Sci. Technol. **1**, 5, 17 (2013).
- [29] Д.В. Абрамов, О.В. Данилов, Д.С. Китков, К.С. Хорьков, А.С. Черников, С.М. Аракелян. ЖТФ **94**, 2, 284 (2024). [D.V. Abramov, O.V. Danilov, D.S. Kitkov, K.S. Khorkov, A.S. Chernikov, S.M. Arakelyan. Tech. Phys. **94**, 2, 244 (2024).]
- [30] Д.Н. Бухаров, В.Д. Самышкин, А.Ф. Лелекова, Д.А. Бодунов, Т.В. Кононенко, С.М. Аракелян, А.О. Кучерик. Южно-Сибирский науч. вестник **58**, 6, 39 (2024). [D.N. Bukharov, V.D. Samyshkin, A.F. Lelekova, D.A. Bodunov, T.V. Kononenko, S.M. Arakelyan, A.O. Kucherik. South-Siberian Scientific Bull. **58**, 6, 63 (2024).]
- [31] K.S. Khorkov, V.G. Prokoshev, S.M. Arakelian. J. Adv. Mater. Technol. **6**, 2, 101 (2021).
- [32] В.З. Кресин, Ю.Н. Овчинников. УФН **178**, 5, 449 (2008). [V.Z. Kresin, Yu.N. Ovchinnikov. Phys. — Uspekhi **51**, 5, 427 (2008).]

Редактор Е.В. Толстякова