

УДК 548.31

*С. Р. АРТЕМЬЕВ, В. П. ШАПОРЕВ, Б. М. ЦИМБАЛ***ОБ АКТУАЛЬНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

В статье проведен литературный обзор проблемы проведения исследований в области различных групп нитевидных кристаллов, показана актуальность проведения таких исследований в настоящее время. Проанализированы нетрадиционные и традиционные свойства получения различных групп нитевидных кристаллов, направления исследований, результаты проведенных исследований и экспериментов и ряд других важных вопросов.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, методы получения, физические свойства, спектр исследований, актуальность использования.

У статті було проведено підсумковий літературний огляд проблеми проведення досліджень різних груп ниткоподібних кристалів, показано актуальність проведення досліджень у сучасних умовах. Проаналізовано традиційні та нетрадиційні властивості отримання різних груп ниткоподібних кристалів, їх напрямки досліджень, результати проведення експериментів та ряд інших важливих питань. Показано важливість проведення досліджень зазначеної проблематики у питаннях охорони навколишнього середовища.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, методи отримання, фізичні властивості, спектр досліджень, актуальність використання.

The final literary review of problem of realization of researches of different groups of threadlike crystals was conducted in the article, actuality of realization of researches is shown in modern terms. Traditional and unconventional properties of receipt of different groups of threadlike crystals, their directions of researches, results of realization and row of other important questions, are analysed. Importance of realization of researches of the marked range of problems is shown in the questions of guard of environment. It is marked attention on circumstance that direction of researches from the point of view of sources is presented by foreign reviews, however after separate directions the even marked sources and references are not vast enough and need an additional study and careful researches. Thus, it is shown that even today there are a number of problematic places for studying issues related to threadlike crystals and the problem requires new ideas and solutions.

Keywords: threadlike crystals, methods of receipt, physical properties, spectrum of researches, actuality of the use.

Введение. Проблема исследования нитевидных кристаллов и, особенно группы нитевидных кристаллов металлов, ныне достаточно актуальна, так как данная группа металлов относится к «материалам будущего». Спектр использования именно этой группы кристаллов стремительно расширяется и проблематика выращивания таких кристаллов достаточно актуальна и современна. Последние 30 лет показали, что металлоорганические соединения продолжают занимать заметное, если не лидирующее положение среди подобных веществ, при получении металлических порошков, пленок, покрытий или даже, к примеру, пресс-форм из газовой фазы.

И если 50–70 лет назад можно было предположить, что круг возможностей использования данной группы кристаллов и соединений практически ограничен и, можно сказать, обозначен, то ныне, когда наука и производство стремительно расширяются, – такая группа кристаллов вторгается в области науки и производства, где ранее их не было.

Это еще раз подчеркивает тот факт, что наука неисчерпаема, и в ней «нет широкой столбовой дороги». Не смотря на накопленный материал в области исследования нитевидных кристаллов, тем не менее, можно предположить, что его экспериментальная часть и результаты исследований еще недостаточно известны широкому кругу ученых.

Эта статья подводит итог тому литературному обзору, который проводился в рамках написания будущей докторской диссертации и безусловно будет интересна, как определенный научный статистический материал, собранный за несколько лет работы в широком спектре литературных источников по указанной проблематике.

Цели и задачи исследования. Целью данной научной статьи является проведение итогового литературного обзора по проблематике исследования различных групп нитевидных кристаллов. В статье показана актуальность проведения исследований и расширение спектра их проведения по указанной группе соединений.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Итоговый литературный обзор. Ни для не является секретом тот факт, что нитевидные кристаллы обладают рядом свойств, которые существенно отличают их, например, от макрокристаллов.

В первую очередь, в источниках литературы было уделено пристальное внимание упругости и прочности нитевидных кристаллов, что было отображено в [1]. Развитие техники и современного производства предъявляют повышенные требования при изготовлении электроизоляционных материалов и изделий из них, работающих при высоких температурах, в химически агрессивных средах. На их основе в современном производстве успешно получают композиционные материалы.

Ранее, в СССР проблема использования нитевидных кристаллов в производстве начала решаться еще в 50-х годах прошлого столетия. Именно поэтому особый интерес к «вискерам» приходится на указанный период. В то время на производстве было получено и исследовано более 35 элементов и 80 соединений нитевидных кристаллов, что тоже было указано в [1].

Следует заметить тот факт, что оценка данной группы свойств нитевидных кристаллов была также углубленно проведена лишь в середине 20-го века [2]. Именно тогда ученые все более часто стали обращаться к вопросам проведения исследований данной

© С. Р. Артемьев, В. П. Шаповров, Б. М. Цимбал. 2017

группы кристаллов. И если ранее это более касалось зарубежных источников, то в СССР данный вопрос становился более актуальным именно в указанный промежуток времени, не теряя актуальности и до сегодняшнего дня.

Например, такое свойство, как теоретическая прочность нитевидных кристаллов была рассчитана практически 90 лет назад, что указано в [3] и в дальнейшем данный вопрос нашел свое отражение в различных литературных источниках, в частности в [4, 5].

Также в [3–5] были отображены вопросы проведения механических исследований нитевидных кристаллов. В частности, теоретическая прочность кристаллов была рассчитана исследователем Френкелем, что было описано в [3] для простейшей модели еще в 1926 году. Она также была рассчитана и другими исследователями на основании результатов экспериментов электростатического взаимодействия между ионами [4] с учетом Вандерваальсовых сил, о чем было указано в источнике [5].

При проведении исследований учеными были получены различные значения прочностей нескольких групп нитевидных кристаллов, в том числе и металлических, что отображено в таких источниках как [6, 7]. В то время как впрочем, и сейчас основная задача была сведена к получению такого значения прочности, которое было бы близко к, так называемому, «теоретическому».

Проведенный литературно-патентный обзор показал, что в решении проблемы увеличения показателя прочности данной группы кристаллов существенное значение имели работы советского ученого А. В. Степанова, который еще в 50-х годах прошлого столетия разработал физическую теорию разрушения периодически неоднородных анизотропных сред, что было указано в [8].

Именно для нитевидных кристаллов прочность является наиболее важным свойством, которая в разы превосходит такую же прочность как, например, у монокристаллов и поликристаллов. Данный показатель, прежде всего, объясняется совершенством структуры нитевидного кристалла и меньшим количеством различных дефектов. Данные вопросы были отражены, в частности, в [9–13].

Если анализировать источники последних 10–15 лет, то следует отметить, что указанные вопросы рассматривались во время проведения научных конференций, семинаров и симпозиумов, что указано, в частности, в источниках [14–16].

Достаточно пристально в литературных источниках рассматривались вопросы получения нитевидных волокон. В частности, анализ методов волочения и вытяжения (Тейлора) в процессах получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов рассматривался в [17], где анализировались схемы проведенных процессов.

Методы, например, порошковой металлургии в получении таких металлов как вольфрам или молибден анализировались в [18]. Более систематизированные исследования и их результаты по тому же молибдену и молибденовой проволоке были описаны в литературном источнике [19].

Схематическое изображение установки для получения металлических волокон по методу Тейлора подробно изучалось и описано в [20].

В научной статье [21] были проанализированы и систематизированы методы получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов именно с точки зрения показателей их прочности. За основу анализа в данной статье были взяты методы волочения и метод вытяжки. Здесь были подробно представлены схематические описания проведения обоих процессов, обращено внимание на качественные показания полученных итоговых результатов. Проанализированы технологические операции, которые составляют методику проведения указанных процессов и роль каждого из них.

Проведенный анализ различных публикаций показал, что по состоянию на окончание 20-го века работ, специально посвященных, например, изучению магнитных и оптических свойств нитевидных металлических (и других) кристаллов было не так много, причем основная масса из них была иностранного происхождения и в то время крайне труднодоступна.

Если брать источники, например, более современного характера, то в [22] авторами были рассмотрены перспективные направления использования «вискеров» именно с учетом влияния их характеристик на развитие конкретных направлений научных исследований, в том числе в области оптики.

В [23] коллективом авторов были рассмотрены вопросы технологий обработки нитевидных кристаллов, возможности создания биосовместимых материалов, а также исследованы оптические свойства нитевидных кристаллов как наноматериалов.

В диссертационной работе [24] ученым Номери М. достаточно углубленно рассматривались физические свойства монокристаллов, и особенное внимание было уделено именно оптическим свойствам.

В работе [25] достаточно углубленно обговаривались вопросы, связанные с особенностями оптических спектров некоторых нитевидных нанокристаллов, а в работе [26] по схожим группам нитевидных кристаллов обсуждались вопросы, в том числе и результаты проведенных оптических исследований нановолокон кристаллов SnO₂.

Изучение магнитных свойств нитевидных кристаллов многими исследователями проводилось преимущественно на железе, что было проанализировано, в частности, в [27]. Главным методом выявления доменов служил метод магнитных порошков, позволяющий обнаруживать не только доменную структуру, но и движение стенок доменов, что было указано в [28].

Исследование нитевидных кристаллов, например, кобальта, изучали ученые Кацер и др., что представлено в [29]. Они на практических экспериментах обнаружили, что зависимость ширины домена от толщины образца подчиняется степенному закону $2/3$, а не $1/2$, как это предсказывает теория.

Нитевидные кристаллы в силу ряда их особенностей, таких как малое количество дефектов, малые размеры, малые вихревые токи ныне стали таким объектом, в которых удалось наблюдать даже слабые диамагнитные эффекты. К таким явлениям относится,

например, эффект Хааза-ван Альфена – периодическое изменение магнитной восприимчивости с изменением напряженности магнитного поля, наблюдающееся только при низких температурах, когда оно не маскируется другими более сильными магнитными эффектами.

Ученый Шёнберг первым наблюдал данный эффект Хааза-ван Альфена на нитевидных кристаллах меди и указал это в [30]. В 1963 году учеными Андерсоном и Голдом [31] впервые наблюдался этот эффект на ферромагнитном материале, используя при этом в качестве объекта нитевидные кристаллы железа.

В 1964 году исследователями Люборски и Морелоком [32] в опытах по намагничиванию нитевидных кристаллов железа и сплавов железо – кобальт было показано, что зависимость коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и гистерезиса от толщины образцов при хаотическом их расположении хорошо совпадает с расчетными данными для вихревой модели в кристаллах тоньше 1000 Å. Эти данные дали в то время первое экспериментальное подтверждение существования вихревого намагничивания, о котором говорилось исключительно в теории.

На нитевидных кристаллах железа толщиной от 40 до 400 мк трех различных ориентировок исследователями Айсинем и Кольменом в [33] исследовалось влияние магнитного поля на электропроводность. Полученные результаты свидетельствовали о незамкнутых поверхностях Ферми.

На нитевидных кристаллах опять-таки железа учеными Родбеллом [34, 35] и Фрайтом [36], а на кобальте – Фрайтом [36] и Симанеком [37] исследовались особенности ферромагнитного и магнитного ядерного резонанса. Во всех указанных работах установлено, что ширина резонансных линий у нитевидных кристаллов всегда выше (иногда и на порядок), чем у макрокристаллов, что подтверждает высокое совершенство их структуры.

Симанек в [37] установил также, что интенсивность резонанса в нитевидных кристаллах кобальта гексагональной фазы больше, чем в макрокристаллах.

Проведенный литературный обзор показал, что люминесценцию в нитевидных кристаллах NaCl, активированных серебром, впервые наблюдала советский ученый Р. И. Гиндина в 1961 году, что описано в [38]. Кристаллы выращивались из водного раствора, содержащего AgCl, через пористую перегородку – целлофан. Поскольку нитевидные кристаллы имели малую длину (3 – 5 мм), изучение свечения отдельных образцов не проводилось. Наблюдалось голубое свечение всей массы выросших кристаллов при облучении ультрафиолетом.

Подробное изучение люминесцентных свойств нитевидных кристаллов NaCl было проведено также Г. Лидером, Г. Бережковой и В. Рожанским, о чем указано в [39]. Неравномерность расположения активатора в кристалле проверялось на отдельных образцах в ультрафиолетовом микроскопе.

Исследователи Рейнольдс и Грин [40] установили отсутствие краевой люминесценции в нитевидных кристаллах CdS, которая в обычных кристаллах приписывается присутствию вакансий на местах ионов

серы. В нитевидных кристаллах появление краевой люминесценции вызывало только облучение их протонами с энергией 1 МэВ, достаточной для образования вакансий, как на местах ионов серы, так и кадмия.

Советские исследователи Гольденберг и Мелик-Гайказян в [41] исследовали процесс накопления F-центров в нитевидных кристаллах NaCl. Накопление F-центров в нитевидных кристаллах под действием ионизирующего излучения происходило в две стадии, причем вторая стадия связана с локализацией электронов на ионных вакансиях, генерируемых при облучении.

В 1963 году исследователь Балларо и др., что было указано в [42], изучали особенности образования центров окрашивания при рентгеновском облучении нитевидных кристаллов KCl. Было обнаружено лишь небольшое отличие их от обычных монокристаллов в ходе кривой поглощения. Это обстоятельство было связано с тем, что исследовались довольно толстые образцы размером в 10–80 мкм, не обладающие высоким совершенством структуры.

В научной статье [43] были обобщены выводы по проведенным исследованиям магнитных и оптических свойств различных групп нитевидных кристаллов, рассмотрена характеристика зависимости их магнитных свойств, как от поверхностного, так и от их объемного совершенства, детально обсуждены вопросы накопления F-центров в нитевидных кристаллах под воздействием ионизирующего излучения.

Французский спелеолог Де Кастере в [44] описывал тончайшие нити карбоната кальция и гипса, свисавшие с потолка и стен и обладавшие такой гибкостью, что их можно было обертывать вокруг пальца и даже завязывать в узел.

Проведенный анализ актуальности применения нитевидных кристаллов в современном производстве был обобщен в [45]. Там было указано, что за последние 20–30 лет успешно развивается направление, связанное с практическим использованием классических кремниевых вискероов для атомно-силовой и магнито-силовой микроскопии.

Именно сейчас на производстве достаточно актуальным направлением их использования есть создание одно и двухкомпонентных вискероов с полупроводниковыми свойствами (GaN, ZnO, InSb). Несомненная перспективность этого направления связана с развитием химии и физики наносистем, поскольку упорядоченный ансамбль таких нановискероов может рассматриваться в качестве системы с уникальными оптическими свойствами, в которых проявляются квантовые эффекты («квантовые точки», «квантовые нити»), в ряде случаев такие системы рассматриваются в контексте дизайна «фотонных кристаллов».

Прогресс в производстве микроэлектроники, в медицине, экологии во многом определяется уровнем работ в области суперионных проводников. Вискероы, при наличии у них особой кристаллической структуры, обуславливающей смешанную электронно-ионную проводимость, могут быть использованы для создания электродных и мембранных материалов нового поколения в силу уникального сочетания выдающихся механических свойств и суперионной проводимости.

К достоинствам потенциальных электродов из нитевидных кристаллов относятся также возможность легкого придания им желаемой формы и дешевизна. Развитие современного производства показало, что нитевидные кристаллы являются уникальнейшим материалом для изготовления тензодатчиков и достаточно конкретные данные по этому направлению показаны в работах [46–50].

В достаточно популярном научном издании [51] описано успешное использование магнитных вискозоров в магнитных пленках, дисках. Здесь же показано успешное использование металлических «усов» в процессе армирования сварных швов, электрических контактов, при производстве бесконтактных ключей, безщеточных двигателей постоянного тока, инфракрасных поляризаторов, термических проводников, при их использовании в контактных схемах для получения изображения.

В ряде работ, касающихся, главным образом, практического использования нитевидных кристаллов, как показал литературный обзор, появились данные, свидетельствующие о том, что модули упругости нитевидных кристаллов ряда керамик (в том числе и Al_2O_3) значительно превосходят модули упругости обычных материалов, что описано в [52].

Однако последующими исследованиями, как было указано в [53] уже утверждалось, что модули нитевидных кристаллов Al_2O_3 не отличаются по абсолютной величине от модулей макрокристаллов.

Проведенные учеными практические испытания показали, что предельная прочность нитевидных кристаллов однозначно зависит от их диаметра. Впервые это было отмечено Дьюлаи в работе [54] на нитевидных кристаллах известного кристалла NaCl: при уменьшении диаметра от 15 – 20 мк до 1 – 2 мк прочность возрастала от 2 – 4 до 100 кГ/мм². Впоследствии существование такой зависимости было подтверждено на нитевидных кристаллах многих веществ.

Исследователю Фридману удалось проследить ее до толщины 0,15 мк на нитевидных кристаллах и, так называемых, щепках LiF, которые образуются при раскалывании ионных кристаллов. Эти щепки по механическим свойствам подобны нитевидным кристаллам [55–59], однако существенно от них отличаются по ряду других признаков.

Именно в щепках избирательным травлением учеными была обнаружена очень высокая плотность дислокаций (до 10^9 см⁻²). Дислокации располагались, как правило, вдоль следов скольжения. Это свидетельствовало, в свою очередь, о том, что щепки претерпевали пластическую деформацию в процессе их образования.

Растворимость щепок оказалась значительно выше, чем у нитевидных кристаллов, что было указано в [60]. Некоторые грани поверхности щепок при этом имели грубый рельеф ступеней скола. Причиной разрушения щепок, как показали исследования, часто являлись распространяющиеся с поверхности трещины.

Природа эффекта повышения прочности тонких нитей кристаллов была впервые выдвинута достаточно давно, в 1933 году Александровым и Журковым в их книге [61] и заключалась во введении представле-

ния о том, что зависимость прочности тонких нитей от их толщины обусловлена присутствием различных по действию на прочность дефектов материала, распределенных по всему образцу.

Однако полученные позже для нитевидных кристаллов данные средних прочностей были несколько завышенными, поскольку при испытаниях происходил произвольный отбор наиболее ровных образцов с гладкими и совершенными поверхностями. Масштабный эффект, т.е. повышение прочности кристалла с уменьшением диаметра образцов, наблюдалась при этом как на кристаллических, так и на некристаллических материалах.

Хорошо описана и показана коллективом ученых необычайно высокая прочность тонких стеклянных нитей в источнике [62]. Советский ученый Бережкова Г. В. при этом отмечала в работах [63, 64], что на стеклянных волокнах прочностью 280–370 кГ/мм² не было замечено изменений прочности при уменьшении их диаметра от 200 до 50 мк. Это было связано с тем, что все нити изготовлялись в строго идентичных условиях, приводящих к очень высокому качеству поверхности. Если же брать обычные материалы, то в них наблюдалось повышение прочности кристалла с уменьшением диаметра образцов, что было описано в [65].

В свою очередь ученые Пирсон, Рид и Фельдман в работе [66] проводили сравнение прочности нитевидных кристаллов Si и образцов тех же размеров, вытравленных из массивных кристаллов Si. Как показали результаты исследований при диаметрах от 50 до 25 мк, прочность их заметно не отличалась, что описано, в свою очередь, в [67]. В [68] было отмечено, что прочность микропроводов значительно медленнее падает с ростом толщины, и эта зависимость сохраняется до диаметров 30 мк (у нитевидных кристаллов до 8–10 мк).

Исследователи Гольденберг и Бычкова в своем труде [69] описывали исследования, проведенные на оптически совершенных нитевидных кристаллах NaCl, полученных испарением раствора через коллоидную пленку, при котором наблюдалось возрастание микротвердости от 55 кГ/мм² для образцов диаметром 100 мк до 90 кГ/мм² для образцов диаметром 25 мк. Масштабный эффект в нитевидных кристаллах для не очень малых диаметров, так же как и в обычных материалах, может быть связан с уменьшением вероятности встретить опасные дефекты на поверхности или внутри образца.

В научной статье [70] было указано, что для изучения механических свойств нитевидные кристаллы обычно испытывались на изгиб, растяжение, кручение, ползучесть и усталость. Высокие прочностные свойства нитевидных кристаллов обнаруживались при этом практически во всех видах нагружения, хотя иногда характер напряженного состояния существенно изменял предел текучести.

В материале данной статьи были рассмотрены результаты различных ранее проведенных исследований прочностных характеристик различных групп нитевидных кристаллов, проанализированы результаты данных исследований с точки зрения использования кристаллов, более углубленно рассмотрены принципы

влияния механических испытаний на структуру кристаллической решетки и свойства нитевидных кристаллов.

Относительно электрических свойств нитевидных кристаллов стоит отметить, что в процессе электролиза в области малых токов металл на катоде иногда осаждается в форме нитей. Обычно такое явление наблюдается в электролитах, содержащих органические примеси (олеиновую кислоту, желатин и др. [71–73]), однако возможны и другие случаи.

В опытах Ван-дер-Мёлена [74] монокристаллические нити вырастали только в присутствии ионов Cl^- . Нитевидные образования на катоде не всегда являются монокристаллами, как показали металлографические исследования Овенстона и др. [75] и рентгеновские Прайса и др. [77].

Например, исследователями Графом и Моргенштерном [78], были получены нити Ag в состаренных растворах AgNO_3 , при этом присутствие в электролите ионов CN^- и I^- затрудняло нитевидный рост.

При этом было установлено ряд интересных фактов. Росту нитевидных кристаллов способствуют (но не инициируют) мелкие нерастворимые частицы (например, графит, стекло и др.). Важным условием образования нитей является отсутствие доступа в электролит кислорода.

Прочность нитей, образующихся при электролизе, всегда ниже, чем у нитевидных кристаллов тех же металлов, полученных другими способами, электросопротивление значительно выше. Все это свидетельствует о том, что в процессе электроосаждения происходит захват примесей растущим кристаллом.

Подробное изучение закономерностей роста нитевидных кристаллов Ag при электролизе было проведено исследователем К. М. Горбуновой с сотрудниками, о чем выше указаны соответствующие источники. Исследовалось влияние концентрации AgNO_3 , примесей, силы тока. В качестве пассивирующих примесей использовались – олеиновая кислота, желатин, альбумин и др.

Рост тонких нитевидных кристаллов, по представлению К. Горбуновой, может происходить в соответствии с дислокационным механизмом. Более толстые нитевидные кристаллы могут расти путем зарождения и разрастания двумерных зародышей на торцевой поверхности кристалла. По мнению К. Горбуновой, большую роль в образовании нитевидных кристаллов при электролизе играет поверхностная диффузия.

Развивая эти представления, Прайс, Бермилля и Вебб на основании собственных наблюдений за образованием нитевидных кристаллов Ag при электролизе AgNO_3 и результатов той же К. Горбуновой предложили теорию этого процесса.

В отличие от Прайса, В. Ваграмян в 1971 году установил неравномерный характер диффузионного потока молекул ПАВ к боковой поверхности. Он предложил уравнение, удовлетворительно объясняющее особенности электролитического выращивания металлических осов.

Исследователь Берри и др. [78] наблюдали образование нитевидных кристаллов из припоя на тонко-

пленочных электросопротивлениях (главным образом, около положительных контактов) при пропускании через них токов, когда припой начинает локально плавиться.

Образование «нитей» начиналось после некоторого инкубационного периода длительностью от секунд до недель. При нагревании припоя в отсутствие электрического тока нитевидные кристаллы не образовывались. Состав самого сопротивления не играл при этом никакой роли, так как нитевидные кристаллы образовывались исключительно только из материала припоя, причем около положительного контакта образовывались нитевидные кристаллы, обогащенные одной компонентой сплава, около отрицательного – другой. Авторы объясняли наблюдаемое явление эффектом электропереноса или электромиграции в металлическом проводнике, когда четко проявляется ионная проводимость металла.

Большая группа работ выполнена была выполненна исследователем Бэконом и др. [79–83] по получению и изучению высокопрочных нитевидных кристаллов графита. Нитевидные кристаллы графита образовывались в дуге высокого давления при токе 70 – 80 а в закрытой камере, наполненной инертным газом под давлением 90 атм. По мере испарения положительного электрода на отрицательном электроде образуются були длиной в несколько сантиметров, насквозь проросшие нитевидными кристаллами толщиной от 0,5 до 5 мк и длиной до 3 см.

При этом они вырастали в форме пластинок и полых трубок с различными поперечными сечениями – треугольными, квадратными и круглыми. Но наиболее интересной формой обладали нитевидные кристаллы, образованные из базисных лент, закрученных в цилиндрическую, так называемую, «сигару». Каждая лента имела толщину в несколько сот ангстрем.

Механизм образования таких форм в те времена был еще недостаточно ясен, но в природе такие образования встречаются и в нынешних условиях довольно часто.

При исследованиях строения хризотилловых асбестов, относящихся к разряду параллельно-волокнистых агрегатов, проведенных исследователем Ядой [84] на электронном микроскопе с высокой разрешающей способностью, было обнаружено, что большая часть нитей имеет форму полых цилиндров, состоящих из спирально закрученных слоев. В поперечных сечениях были видны мультиспирали, которые автор связывал с присутствием винтовых дислокаций. По данной проблеме ученые проводили эксперименты по выращиванию нитевидных кристаллов методом восстановления галогенидов во внешнем электрическом поле.

Так, Мазур и Рафалович [85], Гоффман и др. [86] изучали влияние электрического поля на образование нитевидных кристаллов Cu, Ag и Fe при восстановлении галогенидов в водороде. Нитевидные кристаллы Cu в электрическом поле вырастали более короткими, Ag и Fe, наоборот, – длиннее и в большем количестве, чем без поля. Эти опыты доказали свидетельство того, что материалом для роста нитевидных кристаллов являются наряженные частицы (ионы или поляризован-

ные молекулы). При этом не исключался и не ионный механизм роста.

Рост нитевидных кристаллов различных элементов в электрическом поле осуществлялся также учеными Гомером [87–90] и Мелмедом [91–96]. Нитевидные кристаллы ими выращивались внутри видоизмененной камеры ионного проектора в условиях высокого вакуума (до 10^9 мм рт. ст.) и при напряжении до 5 кВт.

Образование нитевидных кристаллов окиси молибдена в электрическом поле напряженностью до 4 кВ наблюдали также исследователи Левовский и

Суджак [97], однако, по мнению авторов, выращенные нити были поликристаллическими.

Выводы. В статье был проведен итоговый литературный обзор проблемы проведения исследований в области различных групп нитевидных кристаллов, показана актуальность проведения таких исследований в настоящее время. Проанализированы нетрадиционные и традиционные свойства получения различных групп нитевидных кристаллов, их свойства, направления исследований, результаты проведенных исследований и ряд других важных вопросов.

Список литературы:

1. Бережкова, Г. В. Нитевидные кристаллы [Текст] / Г. В. Бережкова. – М.: Госиздат, 1969. – 158 с.
2. Gordo, J. E. Endeavour [Text] / J. E. Gordo. – 1964. – Issue 23. – P. 8.
3. Fraenkel, I. Z. Phys. [Text] / I. Fraenkel. – 1926. – Issue 37. – P. 572.
4. Zwicky, F. Z. Phys. [Text] / F. Zwicky. – 1923. – Issue 24. – P. 131.
5. De Boer, J. H. Trans. Faraday Soc. [Text] / J. H. De Boer. – 1936. – Issue 32. – P. 10.
6. Mackenzie, J. K. Thesis Univ. Bristol [Text] / J. K. Mackenzie. – 1948. – Issue 11. – P. 21–24.
7. Orowan, E. Problems of plastic gliding [Text] / E. Orowan // Proceedings of the Physical Society. – 1940. – Vol. 52, Issue 1. – P. 8–22. doi: [10.1088/0959-5309/52/1/303](https://doi.org/10.1088/0959-5309/52/1/303)
8. Keller, E. Reports & Comments – "Whiskers as Reinforcement Materials" / E. Keller // Industrial & Engineering Chemistry. – 1964. – Vol. 56, Issue 4. – P. 9–10. doi: [10.1021/ie50652a002](https://doi.org/10.1021/ie50652a002)
9. Hoffmann, G. A. J. Metals [Text] / G. A. Hoffmann. – 1958. – Issue 10. – P. 591.
10. Hoffmann, G. A. Astronautics [Text] / G. A. Hoffmann. – 1958. – Issue 3. – P. 31.
11. Hoffmann, G. A. Neu Sci. [Text] / G. A. Hoffmann. – 1961. – Issue 9. – P. 40.
12. Levett, A. P. Mater. Res. and Standarts [Text] / A. P. Levett. – 1966. – Issue 6. – P. 64.
13. McCreight, L. R. Ceramic and Graphite Fibers and Whiskers [Text] / L. R. McCreight, H. W. Rauch, W. H. Sutton. – N.Y. – London: Acad. Press, 1965. – 244 p.
14. Нитевидные кристаллы [Текст] // Исследования и разработки по приоритетному направлению развитию науки, технологий и техники «Индустрия наносистем и материалы». – Москва, 2007.
15. Шишелова, Т. И. Нитевидные кристаллы [Текст] / Т. И. Шишелова, Н. Е. Степанова, Д. А. Плынская, М. А. Беляева // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 8. – С. 12–13.
16. Нитевидные кристаллы [Текст] // Исследования и разработки по приоритетному направлению развитию науки, технологий и техники «Индустрия наносистем и материалы». – Москва, 2007.
17. Дерягин, Б. В. УНФ ДАН СССР [Текст] / Б. В. Дерягин, Д. В. Федосеев, В. М. Лукьянович, Б. В. Синицин, В. А. Рябов, А. В. Лаврентьев. – М.: Госиздат, 1968. – № 5. – С. 1094.
18. McAleer, W. J. Vapor Phase Growth of Gallium Arsenide Crystals [Text] / W. J. McAleer, H. R. Barkemeyer, P. I. Pollak // Journal of The Electrochemical Society. – 1961. – Vol. 108, Issue 12. – P. 1168. doi: [10.1149/1.2427980](https://doi.org/10.1149/1.2427980)
19. Barns, R. L. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society [Text] / R. L. Barns, W. C. Ellis. – 1964. – Vol. 16. – 761 p.
20. James, D. W. F. Silicon whisker growth and epitaxy by the vapour-liquid-solid mechanism [Text] / D. W. F. James, C. Lewis // British Journal of Applied Physics. – 1965. – Vol. 16, Issue 8. – P. 1089–1094. doi: [10.1088/0508-3443/16/8/305](https://doi.org/10.1088/0508-3443/16/8/305)
21. Артемьев, С. П. Анализ методов получения непрерывных волокон нитевидных кристаллов [Текст] / С. П. Артемьев, В. П. Шанорев // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: механіко-технологічні системи та комплекси. – 2016. – № 17 (1189). – С. 14–18.
22. Шишелова, Т. И. Нитевидные кристаллы [Текст] / Т. И. Шишелова, Н. Е. Степанова, Д. А. Плынская, М. А. Беляева // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 8. – С. 12–13.
23. Нитевидные кристаллы [Текст] // Исследования и разработки по приоритетному направлению развитию науки, технологий и техники «Индустрия наносистем и материалы». – Москва, 2007.
24. Номери, М. А. Х. Получение и исследование оптических свойств полупроводниковых оксидов ZnO_2 и Zn_2O_3 [Текст]: дисс. ... канд. физ.-мат. наук / Х. А. М. Номери. – Воронеж, 2011. – 128 с.
25. Рябцев, С. В. Особенности оптических спектров нитевидных нанокристаллов SnO_2 [Текст] / С. В. Рябцев, Н. М. А. Хадия, Ф. М. Чернышов, С. В. Рябцев, Э. П. Домашевская // VII Всероссийская конференция-школа «Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении (индустрия наносистем и материалы)». – Воронеж, 2009. – С. 308–311.
26. Домашевская, Э. П. Морфологические, структурные и оптические исследования нановолокон SnO_2 , синтезированных из порошка SnO [Текст] / Э. П. Домашевская, Н. М. А. Хадия, П. В. Середин, С. В. Рябцев // Фагран – 2008: IV Всероссийская конференция «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах». – Воронеж, 2008. – С. 367–371.
27. Coleman, R. V. Magnetic Domain Patterns on Single-Crystal Iron Whiskers [Text] / R. V. Coleman, G. G. Scott // Physical Review. – 1957. – Vol. 107, Issue 5. – P. 1276–1280. doi: [10.1103/physrev.107.1276](https://doi.org/10.1103/physrev.107.1276)
28. Kaczér, J. Domain structure of cobalt whiskers [Text] / J. Kaczér, R. Gemperle, Z. Hauptman // Czechoslovak Journal of Physics. – 1959. – Vol. 9, Issue 5. – P. 606–612. doi: [10.1007/bf01556951](https://doi.org/10.1007/bf01556951)
29. Гауптман, З. Рост кристаллов. Т. III [Текст] / З. Гауптман, Я. Кауцер, Р. Гемперле. – Изд-во АН СССР, 1961. – 159 с.
30. D. Shoenberg The De Haas–Van Alphen Effect in Copper [Text] / D. Shoenberg // Nature. – 1959. – Vol. 183, Issue 4655. – P. 171–171. doi: [10.1038/183171a0](https://doi.org/10.1038/183171a0)
31. Anderson, J. R. de Haas–van Alphen Effect and Internal Field in Iron [Text] / J. R. Anderson, A. V. Gold // Physical Review Letters. – 1963. – Vol. 10, Issue 6. – P. 227–229. doi: [10.1103/physrevlett.10.227](https://doi.org/10.1103/physrevlett.10.227)
32. Luborsky, F. E. Magnetization Reversal of Almost Perfect Whiskers [Text] / F. E. Luborsky, C. R. Morelock // Journal of Applied Physics. – 1964. – Vol. 35, Issue 7. – P. 2055–2066. doi: [10.1063/1.1702791](https://doi.org/10.1063/1.1702791)
33. Ison, A. Phys. Rev. [Text] / A. Ison, R. V. Coleman. – 1965. – Issue 137. – P. 1609.
34. Rodbell, D. S. Ferromagnetic Resonance of Iron Whisker Crystals [Text] / D. S. Rodbell // Journal of Applied Physics. – 1959. – Vol. 30, Issue 4. – P. S187–S188. doi: [10.1063/1.2185880](https://doi.org/10.1063/1.2185880)
35. Rodbell, D. S. Growth and Perfection of Crystals, N. Y., John Wiley [Text] / D. S. Rodbell. – 1959. – Issue 4. – P. 247.
36. Frait, Z. A note on spin-wave resonance in iron whisker single crystals [Text] / Z. Frait // Czechoslovak Journal of Physics. – 1964. – Vol. 14, Issue 3. – P. 205–206. doi: [10.1007/bf01688841](https://doi.org/10.1007/bf01688841)

37. *Frait, Z.* Ferromagnetic resonance on cobalt whiskers [Text] / *Z. Frait* // Czechoslovak Journal of Physics. – 1960. – Vol. 10, Issue 7. – P. 546–547. doi: [10.1007/bf01557364](https://doi.org/10.1007/bf01557364)
38. *Šimánek, E.* Nuclear magnetic resonance in cobalt whiskers [Text] / *E. Šimánek* // Czechoslovak Journal of Physics. – 1962. – Vol. 12, Issue 1. – P. 81–83. doi: [10.1007/bf01688402](https://doi.org/10.1007/bf01688402)
39. *Гиндина, П. И.* Исследования по люминесценции [Текст] / *П. И. Гиндина* // Журнал прикладной физики. – 1961. – № 2. – С. 148–152.
40. *Людер, В. В.* Физика твердого тела [Текст] / *В. В. Людер, Г. В. Бережкова, В. Н. Рожанский* // ФТТ. – 1963. – № 5. – С. 1479.
41. *Reynolds, D. S.* Bull. Amer. Phys. Soc. [Text] / *D. S. Reynolds, L. C. Greene.* – 1958. – Issue 3. – P. 108.
42. *Гольденберг, С. У.* Физика твердого тела [Текст] / *С. У. Гольденберг, И. Я. Мелик-Гайказян* // ФТТ. – 1964. – № 6. – С. 3484.
43. *Ballaro, S.* X-ray generation of F centers in KCl whiskers [Text] / *S. Ballaro, G. Chiarotti, G. Cubiotti, V. Grasso* // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1965. – Vol. 26, Issue 4. – P. 729–734. doi: [10.1016/0022-3697\(65\)90025-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90025-9)
44. *Артемьев, С. П.* Анализ результатов исследований магнитных и оптических свойств нитевидных кристаллов [Текст] / *С. П. Артемьев* // Вісник національного технічного університету «ХПИ». Серія: механіко-технологічні системи та комплекси. – 2014. – № 40 (1083). – С. 154–160.
45. *Кастере, Д.* Десять лет под землей [Текст] / *Д. Кастере.* – М.: Госгео-графиздат, 1956. – 122 с.
46. *Артемьев, С. П.* Об актуальности применения нитевидных кристаллов в современном производстве [Текст] / *С. П. Артемьев* // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". Новые решения в современных технологиях. – 2013. – № 56 (1029). – С. 204–208.
47. *Parratt, N. J.* Powder. Met. [Text] / *N. J. Parratt.* – 1964. – Issue 7. – P. 152.
48. *Сандулова, А. В.* Физика твердого тела [Текст] / *А. В. Сандулова, И. И. Марьямова, Ю. И. Загоняч* // Журнал физики. – 1965. – № 7. – С. 1581.
49. *Mach. Design.* [Text]. – 1960. – Issue 32. – P. 27.
50. *Mach. Design.* [Text]. – 1960. – Issue 32. – P. 19.
51. *Electronics* [Text]. – 1961. – Issue 34. – P. 68.
52. *Сыркин, В. Г.* Материалы будущего: О нитевидных кристаллах металлов [Текст] / *В. Г. Сыркин.* – М.: Наука, 1990. – 192 с.
53. *Бокштейн, С. З.* Физика твердого тела [Текст] / *С. З. Бокштейн, С. Т. Кишкин, М. П. Назарова, И. Л. Светлов* // ФТТ. – 1967. – Т. 9. – С. 1887.
54. *Бокштейн, С. З.* Физика твердого тела [Текст] / *С. З. Бокштейн, Г. Н. Зайцев, М. Й. Назарова, И. Л. Светлов* // ФТТ. – 1968. – Т. 10, № 2. – С. 564.
55. *Gyulai, Z.* Festigkeits- und Plastizitätseigenschaften von NaCl-Nadelkristallen [Text] / *Z. Gyulai* // Zeitschrift für Physik. – 1954. – Vol. 138, Issue 3-4. – P. 317–321. doi: [10.1007/bf01340676](https://doi.org/10.1007/bf01340676)
56. *Venables, J. D.* Identification of Precipitates on Grown-In Dislocations in MgO [Text] / *J. D. Venables* // Journal of Applied Physics. – 1963. – Vol. 34, Issue 2. – P. 293–297. doi: [10.1063/1.1702602](https://doi.org/10.1063/1.1702602)
57. *Hulse, O. J.* Amer. Ceram. Soc. [Text] / *O. Hulse.* – 1961. – Issue 44. – P. 572.
58. *Дикина, Л. С.* Физика твердого тела [Текст] / *Л. С. Дикина, А. А. Шпунт* // ФТТ. – 1962. – Т. 4. – С. 556.
59. *Стрелков, П. Г.* Физика твердого тела [Текст] / *П. Г. Стрелков, А. А. Шпунт* // ФТТ. – 1962. – Т. 4. – С. 2258.
60. *Фридман, В. Я.* Физика твердого тела [Текст] / *В. Я. Фридман, А. А. Шпунт* // ФТТ. – 1963. – Т. 5. – С. 790.
61. *Фридман, В. Я.* Физика твердого тела [Текст] / *В. Я. Фридман, А. А. Шпунт* // ФТТ. – 1964. – Т. 6. – С. 489.
62. *Александров, А. П.* Явление хрупкого разрыва [Текст] / *А. П. Александров, С. Н. Журков.* – М.: Изд. ГТТИ, 1933. – 215 с.
63. *Буров, К. А.* Научный журнал ЖТФ [Текст] / *К. А. Буров, М. В. Классен-Неклюдова, Г. А. Андреевская, Г. Д. Тенсон, Ю. Е. Томилоский, М. А. Чернышова* // ЖТФ. – 1945. – Т. 15. – С. 407.
64. *Ollo, W. J.* Amer. Ceram. Soc. [Text] / *W. Ollo.* – 1955. – Issue 38. – P. 122.
65. *Thomas, W. F.* Strength of Glass Fibres [Text] / *W. F. Thomas* // Nature. – 1958. – Vol. 4614. – P. 1006–1006. doi: [10.1038/1811006a0](https://doi.org/10.1038/1811006a0)
66. *Taylor, G. F.* A Method of Drawing Metallic Filaments and a Discussion of their Properties and Uses [Text] / *G. F. Taylor* // Physical Review. – 1924. – Vol. 23, Issue 5. – P. 655–660.
67. *Pearson, G. L.* Deformation and fracture of small silicon crystals [Text] / *G. L. Pearson, W. T. Read, W. L. Feldmann* // Acta Metallurgica. – 1957. – Vol. 5, Issue 4. – P. 181–191. doi: [10.1016/0001-6160\(57\)90164-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(57)90164-5)
68. *Read, W. T.* Dislocations and Mechanical Properties of Crystals [Text] / *W. T. Read, G. L. Pearson.* – N. Y. – London, John Wiley, 1957. – P. 537.
69. *Parker, R. L.* Vapor-Phase Growth Kinetics of Potassium Whiskers by Field Emission [Text] / *R. L. Parker, S. C. Hardy* // The Journal of Chemical Physics. – 1962. – Vol. 37, Issue 8. – P. 1606–1609. doi: [10.1063/1.1733348](https://doi.org/10.1063/1.1733348)
70. *Гольденберг, С. У.* Физика твердого тела [Текст] / *С. У. Гольденберг, А. И. Бычкова* // ФТТ. – 1967. – Т. 9. – С. 674.
71. *Артемьев, С. П.* Свойства нитевидных кристаллов. Механические испытания на прочность [Текст] / *С. П. Артемьев* // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 6, № 1 (14). – С. 4–7. doi: [10.15587/2312-8372.2013.19533](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19533)
72. *Горбунова, К. М.* Рост нитевидных кристаллов [Текст] / *К. М. Горбунова, А. И. Жукова* // ЖФХ. – 1949. – Т. 23. – С. 695.
73. *Горбунова, К. М.* Рост нитевидных кристаллов [Текст] / *К. М. Горбунова, П. Д. Данков* // ЖФХ. – 1949. – Т. 23. – С. 616.
74. *Горбунова, К. М.* Рост кристаллов [Текст] / *К. М. Горбунова* // изд. АН СССР. – 1957. – Т. 1. – С. 48.
75. *Van der Meulen P. A.* A Study of Whisker Formation in the Electrodeposition of Copper [Text] / *P. A. van der Meulen, H. V. Lindstrom* // Journal of The Electrochemical Society. – 1956. – Vol. 103, Issue 7. – P. 390. doi: [10.1149/1.2430360](https://doi.org/10.1149/1.2430360)
76. *Ovenston, T. C. J.* Filamentary Growths on Copper Cathodes [Text] / *T. C. J. Ovenston, C. A. Parker, A. E. Robinson* // Journal of The Electrochemical Society. – 1957. – Vol. 104, Issue 10. – P. 607. doi: [10.1149/1.2428425](https://doi.org/10.1149/1.2428425)
77. *Price, P. B.* On the growth and properties of electrolytic whiskers [Text] / *P. B. Price, D. A. Vermilyea, M. B. Webb* // Acta Metallurgica. – 1958. – Vol. 6, Issue 8. – P. 524–531. doi: [10.1016/0001-6160\(58\)90167-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(58)90167-6)
78. *Graf, L.* Notizen: Fadenförmige Wachstumsformen bei der Elektrokristallisation des Silbers [Text] / *L. Graf, W. Morgenstern* // Zeitschrift für Naturforschung A. – 1955. – Vol. 10, Issue 4. doi: [10.1515/zna-1955-0415](https://doi.org/10.1515/zna-1955-0415)
79. *Berry, R. W.* Growth of whisker crystals and related morphologies by electrotransport [Text] / *R. W. Berry, G. M. Bouton, W. C. Ellis, D. E. Engling* // Applied Physics Letters. – 1966. – Vol. 9, Issue 7. – P. 263–265. doi: [10.1063/1.1754742](https://doi.org/10.1063/1.1754742)
80. *Bacon, R. B.* Amer. Phys. Soc. [Text] / *R. Bacon, J. C. Bowman.* – 1957. – Vol. 11, Issue 2. – P. 131.
81. *Bacon, R. J.* Appl. Phys. [Text] / *R. Bacon, J. C. Bowman.* – 1957. – Vol. 28. – P. 826.
82. *Bacon, R.* Bull [Text] / *R. Bacon* // Amer. Phys. Soc. – 1958. – Vol. 3. – P. 108.
83. *Bacon, R.* Growth and Perfection of Crystals [Text] / *R. Bacon.* – N. Y. John Wiley, 1959. – 197 p.
84. *Bacon, R.* Growth, Structure, and Properties of Graphite Whiskers [Text] / *R. Bacon* // Journal of Applied Physics. – 1960. – Vol. 31, Issue 2. – P. 283–290. doi: [10.1063/1.1735559](https://doi.org/10.1063/1.1735559)
85. *Yada, K.* Study of chrysotile asbestos by a high resolution electron microscope [Text] / *K. Yada* // Acta Crystallographica. – 1967. – Vol. 23, Issue 5. – P. 704–707. doi: [10.1107/s0365110x67003524](https://doi.org/10.1107/s0365110x67003524)
86. *Mazur, J.* Hypothesis on the ionic mechanism of the growth of whiskers obtained by reduction of the metal halides [Text] / *J. Mazur, J. Rafalowicz* // British Journal of Applied Physics. – 1961. – Vol. 12, Issue 10. – P. 569–571. doi: [10.1088/0508-3443/12/10/316](https://doi.org/10.1088/0508-3443/12/10/316)
87. *Hofman, T.* The influence of an electric field on the growth of copper whiskers [Text] / *T. Hofman, J. Mazur, J. Niklborc, J. Rafalowicz* // British Journal of Applied Physics. – 1961. – Vol. 12, Issue 7. – P. 342–343. doi: [10.1088/0508-3443/12/7/307](https://doi.org/10.1088/0508-3443/12/7/307)

88. Gomer, R. Field Emission from Mercury Whiskers [Text] / R. Gomer // The Journal of Chemical Physics. – 1957. – Vol. 26, Issue 5. – P. 1333–1334. doi: [10.1063/1.1743515](https://doi.org/10.1063/1.1743515).
89. Gomer, R. Surface Diffusion of CO on W [Text] / R. Gomer // The Journal of Chemical Physics. – 1958. – Vol. 28, Issue 1. – P. 168–168. doi: [10.1063/1.1744064](https://doi.org/10.1063/1.1744064).
90. Gomer, R. Growth and Perfection of Crystals [Text] / R. Gomer. – N. Y. John Wiley, 1959. – 126 p.
91. Gomer, R. Comments on "Growth of Crystal Whiskers" by Blakely and Jackson [Text] / R. Gomer // The Journal of Chemical Physics. – 1963. – Vol. 38, Issue 1. – P. 273–274. doi: [10.1063/1.1733479](https://doi.org/10.1063/1.1733479).
92. Melmed, A. J. Field Emission from Metal Whiskers [Text] / A. J. Melmed, R. Gomer // The Journal of Chemical Physics. – 1959. – Vol. 30, Issue 2. – P. 586–587. doi: [10.1063/1.1729993](https://doi.org/10.1063/1.1729993).
93. Melmed, A. J. On the Occurrence of Fivefold Rotational Symmetry in Metal Whiskers [Text] / A. J. Melmed, D. O. Hayward // The Journal of Chemical Physics. – 1959. – Vol. 31, Issue 2. – P. 545–546. doi: [10.1063/1.1730394](https://doi.org/10.1063/1.1730394).
94. Melmed, A. J. Field Emission from Whiskers [Text] / A. J. Melmed, R. Gomer // The Journal of Chemical Physics. – 1961. – Vol. 34, Issue 5. – P. 1802–1812. doi: [10.1063/1.1701081](https://doi.org/10.1063/1.1701081).
95. Melmed, A. J. Electrical Measurement of Whisker Field-Emission Characteristics [Text] / A. J. Melmed // The Journal of Chemical Physics. – 1962. – Vol. 36, Issue 4. – P. 1101–1101. doi: [10.1063/1.1732663](https://doi.org/10.1063/1.1732663).
96. Melmed, A. J. Field-Emission Microscopy of Twins in Vapor-Grown fcc Whiskers [Text] / A. J. Melmed // Journal of Applied Physics. – 1963. – Vol. 34, Issue 11. – P. 3325–3328. doi: [10.1063/1.1729187](https://doi.org/10.1063/1.1729187).
97. Melmed, A. J. Field-Electron and Field-Ion Emission from Single Vapor-Grown Whiskers [Text] / A. J. Melmed // The Journal of Chemical Physics. – 1963. – Vol. 38, Issue 3. – P. 607–612. doi: [10.1063/1.1733713](https://doi.org/10.1063/1.1733713).
98. Lewowski, T. Notizen: Erregung photostimulierter Co-Exoelektronen-emission durch anodische Oxydation von Aluminium [Text] / T. Lewowski // Zeitschrift für Naturforschung A. – 1960. – Vol. 15, Issue 1. doi: [10.1515/zna-1960-0121](https://doi.org/10.1515/zna-1960-0121).

Bibliography (transliterated):

- Berezhkova, G. V. (1969). Nitevidnye kristally. Moscow: Gosizdat, 158.
- Gordo, J. E. (1964). Endeavour, 23, 8.
- Fraenkel, I. (1926). Z. Phys., 37, 572.
- Zwicky, F. (1923). Z. Phys., 24, 131.
- De Boer, J. H. (1936). Trans. Faraday Soc., 32, 10.
- Mackenzie, J. K. (1948). Thesis Univ. Bristol., 11, 21–24.
- Orowan, E. (1940). Problems of plastic gliding. Proceedings of the Physical Society, 52 (1), 8–22. doi: [10.1088/0959-5309/52/1/303](https://doi.org/10.1088/0959-5309/52/1/303)
- Keller, E. (1964). Reports & Comments – "Whiskers as Reinforcement Materials". Industrial & Engineering Chemistry, 56 (4), 9–10. doi: [10.1021/ie50652a002](https://doi.org/10.1021/ie50652a002).
- Hoffmann, G. A. (1958). J. Metals., 10, 591.
- Hoffmann, G. A. (1958). Astronautics, 3, 31.
- Hoffmann, G. A. (1961). Neu Sci., 9, 40.
- Levett, A. P. (1966). Mater. Res. and Standarts, 6, 64.
- McCright, L. R., Rauch, H. W., Sutton, W. H. (1965). Ceramic and Graphite Fibers and Whiskers. N.Y. – London: Acad. Press, 244.
- Nitevidnye kristally (2007). Issledovaniya i razrabotki po prioritetnomu napravleniyu razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki «Industriya nanosistem i materialy». Moscow.
- Shishelova, T. I., Stepanova, N. E., Plynskaya, D. A., Belyaeva, M. A. (2009). Nitevidnye kristally. Uspekhi sovremennoogo estestvoznaniya, 8, 12–13.
- Nitevidnye kristally (2007). Issledovaniya i razrabotki po prioritetnomu napravleniyu razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki «Industriya nanosistem i materialy». Moscow.
- Deryagin, B. V., Fedoseev, D. V., Luk'yanovich, V. M., Sinicin, B. V., Ryabov, V. A., Lavrent'ev, A. V. (1968). UNF DAN SSSR. Moscow: Gosizdat, 5, 1094.
- McAleer, W. J., Barkemeyer, H. R., Pollak, P. I. (1961). Vapor Phase Growth of Gallium Arsenide Crystals. Journal of The Electrochemical Society, 108 (12), 1168. doi: [10.1149/1.2427980](https://doi.org/10.1149/1.2427980)
- Barns, R. L., Ellis, W. C. (1964). The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 16, 761.
- James, D. W. F., Lewis, C. (1965). Silicon whisker growth and epitaxy by the vapour-liquid-solid mechanism. British Journal of Applied Physics, 16 (8), 1089–1094. doi: [10.1088/0508-3443/16/8/305](https://doi.org/10.1088/0508-3443/16/8/305)
- Artem'ev, S. R., Shaporev, V. P. Analiz metodov polucheniya nepreryvnykh volokon nitevidnykh kristallov. Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: mekhaniko-tekhnolohichni systemy ta komplekxy, 17 (1189), 14–18.
- Shishelova, T. I., Stepanova, N. E., Plynskaya, D. A., Belyaeva, M. A. (2009). Nitevidnye kristally. Uspekhi sovremennoogo estestvoznaniya, 8, 12–13.
- Nitevidnye kristally (2007). Issledovaniya i razrabotki po prioritetnomu napravleniyu razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki «Industriya nanosistem i materialy». Moscow.
- Nomeri, M. A. H. (2011). Poluchenie i issledovanie opticheskikh svoystv poluprovodnikovoyh oksidov ZnO₂ i Zn₂O₃. Voronezh, 128.
- Ryabcev, S. V., Hadiya, N. M. A., Chernyshov, F. M., Ryabcev, S. V., Domashevskaya, E. P. (2009). Osobennosti opticheskikh spektrov nitevidnykh nanokristallov SnO₂. VII Vserossiyskaya konferenciya-shkola «Nelineynye processy i problemy samoorganizatsii v sovremenno materialovedenii (industriya nanosistem i materialy)». Voronezh, 308–311.
- Domashevskaya, E. P., Hadiya, N. M. A., Seredin, P. V., Ryabcev, S. V. (2008). Morfologicheskie, strukturnye i opticheskie issledovaniya nanovolokon SnO₂, sintezirovannykh iz poroshka SnO. Fagan – 2008: IV Vserossiyskaya konferenciya «Fiziko-himicheskie processy v kondensirovannom sostoyanii i na mezhfaznykh granichah». Voronezh, 367–371.
- Coleman, R. V., Scott, G. G. (1957). Magnetic Domain Patterns on Single-Crystal Iron Whiskers. Physical Review, 107 (5), 1276–1280. doi: [10.1103/physrev.107.1276](https://doi.org/10.1103/physrev.107.1276)
- Kaczér, J., Gemperle, R., Hauptman, Z. (1959). Domain structure of cobalt whiskers. Czechoslovak Journal of Physics, 9 (5), 606–612. doi: [10.1007/bf01556951](https://doi.org/10.1007/bf01556951)
- Gauptman, Z., Kacer, Ya., Gemperle, P. (1961). Rost kristallov. Vol. III. Izd-vo AN SSSR, 159.
- Shoenberg, D. (1959). The De Haas–Van Alphen Effect in Copper. Nature, 183 (4655), 171–171. doi: [10.1038/183171a0](https://doi.org/10.1038/183171a0)
- Anderson, J. R., Gold, A. V. (1963). de Haas-van Alphen Effect and Internal Field in Iron. Physical Review Letters, 10 (6), 227–229. doi: [10.1103/physrevlett.10.227](https://doi.org/10.1103/physrevlett.10.227)
- Luborsky, F. E., Morelock, C. R. (1964). Magnetization Reversal of Almost Perfect Whiskers. Journal of Applied Physics, 35 (7), 2055–2066. doi: [10.1063/1.1702791](https://doi.org/10.1063/1.1702791)
- Ison, A., Coleman, R. V. (1965). Phys. Rev., 137, 1609.
- Rodbell, D. S. (1959). Ferromagnetic Resonance of Iron Whisker Crystals. Journal of Applied Physics, 30 (4), S187–S188. doi: [10.1063/1.2185880](https://doi.org/10.1063/1.2185880)
27. Rodbell, D. S. (1959). Growth and Perfection of Crystals, N. Y., John Wiley, 4, 247.

36. Frait, Z. (1964). A note on spin-wave resonance in iron whisker single crystals. *Czechoslovak Journal of Physics*, 14 (3), 205–206. doi: [10.1007/bf01688841](https://doi.org/10.1007/bf01688841)
37. Frait, Z. (1960). Ferromagnetic resonance on cobalt whiskers. *Czechoslovak Journal of Physics*, 10 (7), 546–547. doi: [10.1007/bf01557364](https://doi.org/10.1007/bf01557364)
38. Šimánek, E. (1962). Nuclear magnetic resonance in cobalt whiskers. *Czechoslovak Journal of Physics*, 12 (1), 81–83. doi: [10.1007/bf01688402](https://doi.org/10.1007/bf01688402)
39. Gindina, R. I. (1961). Issledovaniya po lyuminescencii. *Zhurnal prikladnoy fiziki*, 2, 148–152.
40. Lider, V. V., Berezhkova, G. V., Rozhanskiy, V. N. (1963). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 5, 1479.
41. Reynolds, D. S., Greene, L. C. (1958). *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 3, 108.
42. Gol'denberg, S. U., Melik-Gaykazyan, I. Ya. (1964). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 6, 3484.
43. Ballaro, S., Chiarotti, G., Cubiotti, G., Grasso, V. (1965). X-ray generation of F centers in KCl whiskers. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 26 (4), 729–734. doi: [10.1016/0022-3697\(65\)90025-9](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90025-9)
44. Artem'ev, S. R. (2014). Analiz rezul'tatov issledovaniy magnitnyh i opticheskikh svoystv nitevidnyh kristallov. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: mekhaniko-tekhnologichni systemy ta komplekxy, 40 (1083), 154–160.
45. Kastere, D. (1956). *Desyat' let pod zemley*. Moscow: Gosgeo-grafizdat, 122.
46. Artem'ev, S. R. (2013). Ob aktual'nosti primeneniya nitevidnyh kristallov v sovremennom proizvodstve. *Vestnik Nac. tekhn. un-ta "HPI"*. No-nye resheniya v sovremennykh tekhnologiyah, 56 (1029), 204–208.
47. Parratt, N. J. (1964). *Powed. Met.*, 7, 152.
48. Sandulova, A. V., Mar'yamova, I. I., Zagonyach, Yu. I. (1965). *Fizika tverdogo tela*. *Zhurnal fiziki*, 7, 1581.
49. *Mach. Design* (1960), 32, 27.
50. *Mach. Design* (1960), 32, 19.
51. *Electronics* (1961), 34, 68.
52. Syrkin, V. G. (1990). *Materialy budushchego: O nitevidnyh kristallah metallov*. Moscow: Nauka, 192.
53. Bokshteyn, S. Z., Kishkin, S. T., Hazarova, M. P., Svetlov, I. L. (1967). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 9, 1887.
54. Bokshteyn, S. Z., Zaycev, G. N., Nazarova, M. Y., Svetlov, I. L. (1968). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 10 (2), 564.
55. Gyulai, Z. (1954). Festigkeits- und Plastizitätseigenschaften von NaCl-Nadelkristallen. *Zeitschrift für Physik*, 138 (3-4), 317–321. doi: [10.1007/bf01340676](https://doi.org/10.1007/bf01340676)
56. Venables, J. D. (1963). Identification of Precipitates on Grown-In Dislocations in MgO. *Journal of Applied Physics*, 34 (2), 293–297. doi: [10.1063/1.1702602](https://doi.org/10.1063/1.1702602)
57. Hulse, O. J. (1961). *Amer. Ceram. Soc.*, 44, 572.
58. Dikina, L. S., Shpunt, A. A. (1962). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 4, 556.
59. Strelkov, P. G., Shpunt, A. A. (1962). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 4, 2258.
60. Fridman, V. Ya., Shpunt, A. A. (1963). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 5, 790.
61. Fridman, V. Ya., Shpunt, A. A. *Fizika tverdogo tela*. FTT, 6, 489.
62. Aleksandrov, A. P., Zhurkov, S. N. (1933). *Yavlenie hrupkogo razryva*. Moscow: Izd. GTTI, 215.
63. Burov, K. A., Klassen-Neklyudova, M. V., Andrievskaya, G. A., Tenson, G. D., Tomilovskiy, Yu. E., Chernyshova, M. A. (1945). *Nauchnyy zhurnal ZHTF*. ZHTF, 15, 407.
64. Ollo, W. (1955). *J. Amer. Ceram. Soc.*, 38, 122.
65. Thomas, W. F. (1958). Strength of Glass Fibres. *Nature*, 4614, 1006–1006. doi: [10.1038/1811006a0](https://doi.org/10.1038/1811006a0)
66. Taylor, G. F. (1924). A Method of Drawing Metallic Filaments and a Discussion of their Properties and Uses. *Physical Review*, 23 (5), 655–660.
67. Pearson, G. L., Read, W. T., Feldmann, W. L. (1957). Deformation and fracture of small silicon crystals. *Acta Metallurgica*, 5 (4), 181–191. doi: [10.1016/0001-6160\(57\)90164-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(57)90164-5)
68. Read, W. T., Pearson, G. L. (1957). *Dislocations and Mechanical Properties of Crystals*. N. Y. – London, John Willey, 537.
69. Parker, R. L., Hardy, S. C. (1962). Vapor-Phase Growth Kinetics of Potassium Whiskers by Field Emission. *The Journal of Chemical Physics*, 37 (8), 1606–1609. doi: [10.1063/1.1733348](https://doi.org/10.1063/1.1733348)
70. Gol'denberg, C. U., Bychkova, A. I. (1967). *Fizika tverdogo tela*. FTT, 9, 674.
71. Artem'ev, S. R. Properties of whiskers. mechanical strength test. *Technology audit and production reserves*, 6 (1 (14)), 4–7. doi: [10.15587/2312-8372.2013.19533](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19533)
72. Gorbunova, K. M., Zhukova, A. I. (1949). *Rost nitevidnyh kristallov*. ZHFH, 23, 695.
73. Gorbunova, K. M., Dankov, P. D. (1949). *Rost nitevidnyh kristallov*. ZHFH, 23, 616.
74. Gorbunova, K. M. (1957). *Rost kristallov*. izd. AN SSSR, 1, 48.
75. Van der Meulen, P. A., Lindstrom, H. V. (1956). A Study of Whisker Formation in the Electrodeposition of Copper. *Journal of The Electrochemical Society*, 103 (7), 390. doi: [10.1149/1.2430360](https://doi.org/10.1149/1.2430360)
76. Ovenston, T. C. J., Parker, C. A., Robinson, A. E. (1957). Filamentary Growths on Copper Cathodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 104 (10), 607. doi: [10.1149/1.2428425](https://doi.org/10.1149/1.2428425)
77. Price, P. B., Vermilyea, D. A., Webb, M. B. (1958). On the growth and properties of electrolytic whiskers. *Acta Metallurgica*, 6 (8), 524–531. doi: [10.1016/0001-6160\(58\)90167-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(58)90167-6)
78. Graf, L., Morgenstern, W. (1955). Notizen: Fadenförmige Wachstumsformen bei der Elektrokristallisation des Silbers. *Zeitschrift Für Naturforschung A*, 10 (4). doi: [10.1515/zna-1955-0415](https://doi.org/10.1515/zna-1955-0415)
79. Berry, R. W., Bouton, G. M., Ellis, W. C., Engling, D. E. (1966). Growth of whisker crystals and related morphologies by electrotransport. *Applied Physics Letters*, 9 (7), 263–265. doi: [10.1063/1.1754742](https://doi.org/10.1063/1.1754742)
80. Bacon, R., Bowman, J. C. (1957). *B. Amer. Phys. Soc.*, 11 (2), 131.
81. Bacon, R., Bowman, J. C. (1957). *J. Appl. Phys.*, 28, 826.
82. Bacon, R. (1958). *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 3, 108.
83. Bacon, R. (1959). *Growth and Perfection of Crystals*. N. Y. John Willey, 197.
84. Bacon, R. (1960). Growth, Structure, and Properties of Graphite Whiskers. *Journal of Applied Physics*, 31 (2), 283–290. doi: [10.1063/1.1735559](https://doi.org/10.1063/1.1735559)
85. Yada, K. (1967). Study of chrysotile asbestos by a high resolution electron microscope. *Acta Crystallographica*, 23 (5), 704–707. doi: [10.1107/s0365110x67003524](https://doi.org/10.1107/s0365110x67003524)
86. Mazur, J., Rafalowicz, J. (1961). Hypothesis on the ionic mechanism of the growth of whiskers obtained by reduction of the metal halides. *British Journal of Applied Physics*, 12 (10), 569–571. doi: [10.1088/0508-3443/12/10/316](https://doi.org/10.1088/0508-3443/12/10/316)
87. Hofman, T., Mazur, J., Nikliborc, J., Rafalowicz, J. (1961). The influence of an electric field on the growth of copper whiskers. *British Journal of Applied Physics*, 12 (7), 342–343. doi: [10.1088/0508-3443/12/7/307](https://doi.org/10.1088/0508-3443/12/7/307)
88. Gomer, R. (1957). Field Emission from Mercury Whiskers. *The Journal of Chemical Physics*, 26 (5), 1333–1334. doi: [10.1063/1.1743515](https://doi.org/10.1063/1.1743515)
89. Gomer, R. (1958). Surface Diffusion of CO on W. *The Journal of Chemical Physics*, 28 (1), 168–168. doi: [10.1063/1.1744064](https://doi.org/10.1063/1.1744064)
90. Gomer, R. (1959). *Growth and Perfection of Crystals*. N. Y. John Willey, 126.
91. Gomer, R. (1963). Comments on "Growth of Crystal Whiskers" by Blakely and Jackson. *The Journal of Chemical Physics*, 38 (1), 273–274. doi: [10.1063/1.1733479](https://doi.org/10.1063/1.1733479)

92. Melmed, A. J., Gomer, R. (1959). Field Emission from Metal Whiskers. The Journal of Chemical Physics, 30 (2), 586–587. doi: [10.1063/1.1729993](https://doi.org/10.1063/1.1729993)
93. Melmed, A. J., Hayward, D. O. (1959). On the Occurrence of Fivefold Rotational Symmetry in Metal Whiskers. The Journal of Chemical Physics, 31 (2), 545–546. doi: [10.1063/1.1730394](https://doi.org/10.1063/1.1730394)
94. Melmed, A. J., Gomer, R. (1961). Field Emission from Whiskers. The Journal of Chemical Physics, 34 (5), 1802–1812. doi: [10.1063/1.1701081](https://doi.org/10.1063/1.1701081)
95. Melmed, A. J. (1962). Electrical Measurement of Whisker Field-Emission Characteristics. The Journal of Chemical Physics, 36 (4), 1101–1101. doi: [10.1063/1.1732663](https://doi.org/10.1063/1.1732663)
96. Melmed, A. J. (1963). Field-Emission Microscopy of Twins in Vapor-Grown fcc Whiskers. Journal of Applied Physics, 34 (11), 3325–3328. doi: [10.1063/1.1729187](https://doi.org/10.1063/1.1729187)
97. Melmed, A. J. (1963). Field-Electron and Field-Ion Emission from Single Vapor-Grown Whiskers. The Journal of Chemical Physics, 38 (3), 607–612. doi: [10.1063/1.1733713](https://doi.org/10.1063/1.1733713)
98. Lewowski, T. (1960). Notizen: Erregung photostimulierter Co-Exoelektronen-emission durch anodische Oxydation von Aluminium. Zeitschrift Für Naturforschung A, 15 (1). doi: [10.1515/zna-1960-0121](https://doi.org/10.1515/zna-1960-0121)

Поступила (received) 06.12.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Щодо актуальності проведення досліджень різних груп ниткоподібних кристалів/ Артем'єв С. Р., Шаповров В. П., Цимбал Б. М. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.3–12. – Bibliogr.:98. – ISSN 2079-5459

Об актуальности проведения исследований различных групп нитевидных кристаллов/ Артемьев С. Р., Шаповров В. П., Цымбал Б. М. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.3–12. – Bibliogr.:98. – ISSN 2079-5459

On the urgency of conducting research on various groups of filamentary crystals/ Artemiev S., Shapovrov V., Cimbal B. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 44 (1266).– P.3–12. – Bibliogr.:98. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Артем'єв Сергій Робленович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, завідувач кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки, 61023, Україна, місто Харків, вул. Чернишевська, 94, e-mail: arctic2667@gmail.com.

Артемьев Сергей Робленович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой охраны труда и техногенно-экологической безопасности, 61023, Украина, Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, ул. Чернышевская, 94, e-mail: arctic2667@gmail.com.

Artem'ev Sergey Roblenovich – PhD, associate professor, zave-blowing the department of labour and tekhnogenno-ekologicheskoy safety protection, 61023, Ukraine, Harkov town, National university of civil defence of Ukraine, street of Chernyshevskaya, 94e-mail: arctic2667@gmail.com.

Шаповров Валерій Павлович – доктор технічних наук, професор, заведуючий кафедрой химической техники и промышленной экологии, 61002, Украина, Национальный политехнический университет «Харьковский политехнический институт», вул. Кирпичева, 2, **Шаповров Валерій Павлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, 61002, Україна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичьова, 2, тел.: 0669160512.

Shapovrov Valeriy Pavlovich – doctor engineerings sciences, professor, zave-bloving the department of chemical engineering and industrial ecology, 61002, Ukraine, Harkov town, National Polytechnic University "Kharkov Polytechnic Institute", street of Kirpicheva, 2,

Цимбал Богдан Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки, 61023, Україна, Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, вул. Чернишевська, 94, tsembalbogdan@ukr.net.

Цимбал Богдан Михайлович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры охраны труда и техногенно-экологической безопасности, 61023, Украина, Национальный университет гражданской защиты Украины, 7. Харьков, ул. Чернышевская, 94, тел: tsembalbogdan@ukr.net.

Cimbal Bogdan Mixaulovich – PhD, senior lecturer the department of labour and tekhnogenno-ekologicheskoy safety protection, 61023, Ukraine, Harkov town, National university of civil defence of Ukraine, street of Chernyshevskaya, 94, e-mail: tsembalbogdan@ukr.net.