

На станке применяются роликовые направляющие. Конструкция и использование предварительно напряженных роликовых блоков сводит возможность люфта по всей длине направляющих до минимума. По всем осям применяется система прямого активного контроля изменения

позиции в реальном времени. Обработывающие центры BLUESTAR могут быть оснащены системой ЧПУ Fanuc или Siemens.

Использованы материалы:  
<http://soldream.com.ua>



## ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 548.31

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27905

### СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ, ИХ АНАЛИЗ

**Артемьев Сергей Робленович**, кандидат технических наук, доцент

Кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности, Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевского, 94, г. Харьков, Украина, 61000

E-mail: sergey.artemev.1967@mail.ru

*В материале статьи в рамках продолжения выполнения литературного обзора рассмотрены результаты проведенных исследований электрических и структурно-чувствительных свойств различных групп нитевидных кристаллов. Показано влияние электрических свойств на структуру кристаллов, проанализированы результаты исследований возникновения заряженных слоев на поверхности нитевидных кристаллов.*

*Ключевые слова:* нитевидные кристаллы, электрические свойства, поляризация, электропроводимость, электрическое сопротивление, сегноэлектрик, электростатический заряд.

*В матеріалі статті в межах продовження виконання літературного огляду за проблемою дослідження розглянуто результати проведених досліджень електричних та структурно-чутливих властивостей різних груп ниткоподібних кристалів. Показано вплив електричних властивостей на структуру кристалів, проаналізовано результати досліджень створення заряджених шарів на поверхні ниткоподібних кристалів.*

*Ключові слова:* ниткоподібні кристали, електричні властивості, поляризація, електропроводимість, електричний опір, сегноелектрик, електростатичний заряд.

#### 1. Введение

С точки зрения предисловия к данной статье следует сразу отметить, что проведенный анализ публикаций показал, что по состоянию на конец 20 века работ, специально посвященных изучению электрических свойств нитевидных металлических кристаллов было не так уж много — не более 40, причем основная масса из них иностранного происхождения и труднодоступна.

И в нынешнем столетии скачка в этом плане не последовало. В частности в [1] авторами рассмотрены перспективные направления использования «вискеров» именно с учетом влияния их характеристик на развитие конкретных направ-

лений научных исследований, в [2] рассмотрены вопросы технологий обработки нитевидных кристаллов, возможности создания биосовместимых материалов, а также исследованы свойства нитевидных кристаллов как наноматериалов. В работе [3] ученым Номери М. достаточно углубленно рассматриваются физические свойства монокристаллов и особенное внимание уделено оптическим свойствам нитевидных кристаллов, но никак ни электрике.

Практически все исследователи отмечали и отмечают, что электрические свойства усов определяются идеальным строением кристаллической решетки, наличием дефектов на поверхности и возможным наличием микропримесей.

Удельное электрическое сопротивление монокристаллических металлических усов диаметром  $< 2$  мкм меньше, чем сопротивление толстых поликристаллических усов диаметром  $> 10$  мкм, и значительно меньше, чем электрическое сопротивление проволочек диаметром 10–20 мкм. Это является прямым следствием наличия дефектов в кристаллической решетке монокристаллических усов, поликристаллических усов и массивных проволочек соответственно.

Г. В. Бережкова в своей монографии [4] отмечает, что, хотя в металлических усах и начинает проявляться так называемый масштабный эффект (он заключается в значительном возрастании доли электронов, отражающихся от поверхности уса), все же полученные экспериментальные данные по измерению удельного электрического сопротивления в значительной мере свидетельствуют о высоком объемном совершенстве монокристаллических усов.

## 2. Цель работы

Целью данной работы есть продолжение выполнения литературного обзора по проблеме исследования такой группы свойств нитевидных кристаллов, как электрические свойства.

В результате проведения данного обзора анализируются и изучаются результаты проведенных исследований электрических и структурно-чувствительных свойств различных групп нитевидных кристаллов, оценивается влияние электрических свойств на структуру самих кристаллов, более углубленно рассматриваются вопросы относительно возникновения заряженных слоев на поверхности нитевидных кристаллов.

## 3. Существующие представления об электрических свойствах нитевидных кристаллов и их обсуждение

Электрические свойства нитевидных кристаллов изучались в процессе проведения исследований на ряде веществ таких как Ag, Cd, Cu, Fe, GaP, Si, SiC, Sn, VO<sub>2</sub>, Zn и др., что было отображено в [5–9]. Особенности электрических свойств нитевидных кристаллов определяются в целом как совершенством их структуры, так и возрастающим влиянием поверхности.

Удельное электрическое сопротивление у нитевидных кристаллов зависит от наличия дефектов в решетке проводника. Хотя в нитевидных кристаллах начинает проявляться масштабный эффект, т. е. значительно возрастает доля электронов, претерпевающих отражение от поверхности образца, все же полученные во второй половине прошлого века экспериментальные данные по измерению удельного сопротивления в значительной мере

свидетельствуют о высоком объемном совершенстве нитевидных кристаллов [10].

Систематические измерения удельного сопротивления нитевидных кристаллов Cu при температурах от 0 до минус 195 °С были проведены Домбровской-Гавдой и ее коллегами. Подобные же измерения на нитевидных кристаллах Ag в интервале температур от комнатной до 4,2 °К были сделаны Юрием Мазуром с сотрудниками [11]. В обоих случаях для сравнения такие же измерения проводились на микропроволочках приблизительно тех же размеров. Было показано, что удельное сопротивление нитевидных кристаллов во всех случаях меньше, чем у микропроволочек той же толщины. Нитевидные кристаллы Cu по удельному сопротивлению становятся сравнимыми с массивной медью при толщинах  $> 10$  мк.

Японский исследователь Китахиро и др. [12] показал, что электропроводность даже в толстых нитевидных кристаллах VO<sub>2</sub> (по толщине приближающихся к микрокристаллам) оказалась в 4 раза меньшей, чем в макрокристаллах (вдоль одинаковых направлений).

К числу структурно-чувствительных свойств нитевидных кристаллов относится и фотопроводимость. Пипер и Рос [13] в частности обнаружили, что в нитевидных кристаллах ZnS фотопроводимость значительно выше, чем в макрокристаллах. Спад в них фототока, вызываемого освещением образца светом с  $\lambda = 3650$  Е, происходит в 10–100 раз быстрее, чем в обычных кристаллах. Это объясняется значительным снижением концентрации ловушек электронов в нитевидных кристаллах.

Гершензон и др. в [14] наблюдали появление фотопроводимости в нитевидных кристаллах GaP, в то время как в макрокристаллах этот эффект отсутствовал. Это свидетельствовало о длительной жизни носителей заряда в совершенной решетке нитевидных кристаллов. Их высокое внутреннее совершенство подтверждается также тем, что в диодах из нитевидных кристаллов пробойное напряжение составляет 135 вольт, а в диодах, изготовленных из макрокристаллов, — 40 вольт.

Остаточное сопротивление нитевидных кристаллов Cu измерялось тоже Домбровской-Гавдой и др., а также Р. Исаевой, Ag — Ю. Мазуром и др., Ag, Cu, Zn, Cd — Хобсом и Стилл-Веллом, Zn — Скове и Стиллвеллом [15], Fe — Айсином и Кольменом [16].

Эта величина в целом зависит от чистоты образца и его внутреннего совершенства, однако в образцах, размеры которых сравнимы с длиной свободного пробега электронов проводимости, вступает в действие дополнительный эффект влияния поверхности. В частности Р. Исаевой на нитевидных кристаллах Cu было установлено, что 60 % электронов проводимости испытывает зеркальное отражение от поверхности.

Американские ученые Хоббс и Стиллвелл, используя различные способы получения нитевидных кристаллов, установили, что в нитевидных кристаллах, полученных восстановлением галогенидов (Ag и Cu), остаточное сопротивление больше, чем в нитевидных кристаллах, полученных осаждением из газовой фазы (Zn и Cd). Остаточное сопротивление в нитевидных кристаллах Cu составляло 10–30 % от общего сопротивления, в Ag – 5 %, в Cd и Zn – всего 1 %.

Некоторые электрические эффекты удобно изучать именно на нитевидных кристаллах. Так, нитевидные кристаллы являются единственным объектом для исследования влияния значительной упругой деформации на электрические свойства, поскольку в микрокристаллах реализуемая упругая деформация не превышает нескольких десятых процента.

Хоббс и Кабрера на нитевидных кристаллах Ag, Cu, Fe, Zn и A. Сандулова и др. на нитевидных кристаллах Si установили линейный закон изменения сопротивления с возрастанием деформации, причем Хоббс и Кабрера проводили измерения в интервале до 2 %. Девис и др. в [17] на нитевидных кристаллах Sn с ориентацией  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$  обнаружили значительное отклонение от линейности (при  $\epsilon > 1\%$ ), что было приписано ими изменению геометрии поверхности Ферми.

На тех же образцах (в области деформаций от 0 до 1,7 %) ими было установлено, что температура перехода в сверхпроводящее состояние является нелинейной функцией деформации.

Исследования соединений NbC, NbN и их смесей в сверхпроводящем состоянии были проведены только на нитевидных кристаллах в связи с трудностями получения крупных кристаллов этих веществ. Измерения проводились на образцах толщиной 2–100 мк. Было установлено, что эти соединения относятся ко II-му типу сверхпроводников.

Температура перехода в сверхпроводящее состояние сильно изменялась от образца к образцу. Для нитевидных кристаллов NbC она находилась в пределах от 7,5 до 10,5 °K, для NbN – от 10 до 14,5 °K, для смесей NbC/NbN – от 8,5 до 17,3 °K. Ширина перехода для отдельных образцов составляла 0,2–0,3 °K. Так называемое явление «переползания» магнитного потока в нитевидных кристаллах проявлялось в значительно более узком интервале изменения тока и магнитного поля, что обычно наблюдается в кристаллах и объясняется малым содержанием дефектов решетки.

В нитевидных кристаллах Ag Ю. Мазуром и др. подтверждено наличие минимума сопротивления при температуре жидкого гелия, что не всегда выявляется на макрокристаллах.

На нитевидных кристаллах Fe < 100 исследователь Диир [18] исследовал температурную

зависимость эффекта Холла в интервале 1–300 °K в поле 21 кгс. Установлено, что коэффициенты Холла при комнатной температуре по порядку величины для нитевидных кристаллов и поликристаллов совпадают. Температурная зависимость этих коэффициентов, однако, сильно различается, особенно в области низких температур. При гелиевых температурах электросопротивление является линейной функцией магнитной индукции.

Сегнетоэлектрические свойства нитевидных кристаллов на примере BaTiO<sub>3</sub> изучались Драгдорфом и др. в [19–21] с применением оптических методов исследования. Были получены подробные сведения о доменной структуре образцов, влиянии на них внешнего электрического поля и пр. и установлено, что нитевидные кристаллы обладают теми же сегнетоэлектрическими свойствами, что и макрокристаллы.

Отдельно следует рассмотреть вопрос об образовании заряженных слоев на поверхности нитевидных кристаллов. Специфичность явления заключается в том, что приповерхностная электрическая поляризация, которая, по-видимому, существует в массивных кристаллах, в тонких нитевидных пластинках может проявляться в виде сквозной поляризации и образовании электрических доменов даже в кристаллах, обладающих центром симметрии.

Г. Бережкова в своей монографии «Нитевидные кристаллы» описывает, что в тонких пластинках нитевидных кристаллов может оказаться энергетически выгодным скопление на их поверхности одноименно заряженных точечных дефектов. Существование зарядов на поверхности кристалла создает отрицательное поверхностное натяжение, сопровождаемое энергетически выгодным уменьшением удельной поверхностной энергии. Заряженные слои могут образоваться в том случае, если уменьшение свободной поверхностной энергии будет больше возрастания удельной энергии электростатического поля внутри кристалла. В исследованных Г. Бережковой кристаллах  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> это условие соблюдается при толщине  $< 1500$  Å.

Существование электрической поляризации было экспериментально обнаружено на лентообразных нитевидных кристаллах  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> путем осаждения на их поверхность одноименно заряженных коллоидных частиц. Наиболее удобными для этого оказались изомерные глобулы латекса.

Нитевидные кристаллы после погружения в коллоидный раствор просматривались в электронном микроскопе. Для того чтобы определить, на какую сторону осаждались глобулы, либо отыскивались образцы, которые можно было наблюдать со стороны бокового ребра, либо после погружения образцов в коллоидный раствор на одну их сторону производилось напыление сплава Pt + Pd.

Частицы, осевшие на этой стороне пластинок, оказались оттененными, и таким образом на

электронно-микроскопическом изображении можно было однозначно различить частицы, осевшие на противоположных поверхностях ленты.

Пластинки, обе поверхности которых заряжены одноименно, встречались очень редко. Такое состояние заряженности неустойчиво, поскольку силы отталкивания между ионами на противоположных сторонах пластинки должны способствовать эмиссии этих ионов с поверхности.

Исследователем Друммом [22] наблюдался самопроизвольный изгиб лентообразных нитевидных кристаллов ALN, вызванный разницей в поверхностном натяжении на противоположных гранях. По его мнению, этот эффект обуславливался отсутствием центра симметрии в кристаллах ALN, в результате чего противоположные поверхности кристаллических лент образовывались различными ионами. Однако и в этом случае разница поверхностных натяжений связана с разноименными электростатическими поверхностными зарядами. Отсутствие центра симметрии способствует стабилизации величины заряда, так как его образование определяется не скоплением заряженных точечных дефектов на поверхности кристалла, а его структурой.

Существование поверхностного заряженного слоя было экспериментально обнаружено также в нитевидных кристаллах титаната бария. Присутствие такого слоя стабилизирует доменную структуру этого сегнетоэлектрика.

#### 4. Выводы

Таким образом, подводя итог рассмотренному материалу литературного обзора по аспекту исследования, можно, по-видимому, сказать, что эффект возникновения поверхностных электрических зарядов в тонких неметаллических кристаллических пластинках является общим явлением для различных групп нитевидных кристаллов. Исследования показали, что достаточно важным электрическим свойством металлических усов есть остаточное сопротивление. Этот параметр зависит от степени совершенства кристаллической решетки и от наличия и количества микропримесей. При этом, если размеры нитевидных кристаллов сопоставимы с длиной свободного пробега электронов проводимости, появляется и еще один важный фактор, от которого зависит остаточное сопротивление — это влияние поверхности. Но это уже предмет отдельных исследований.

#### Литература

1. 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.
2. Нитевидные кристаллы [Текст] : материалы всерос. конф. / Исследования и разработки по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники. Индустрия наносистем и материалы. — Москва. — ФГУ «Российский научный центр «Курчатовский институт», 2007.
3. Номери, Мохамед Абасс Хадия Получение и исследование оптических свойств полупроводниковых оксидов ZnO<sub>2</sub> и Zn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Текст] : дисс. канд. физ.-мат. наук / Хадия Абасс Мохамед Номери. — Воронеж, 2011. — 128 с.
4. Бережкова, Г. В. Нитевидные кристаллы [Текст] / Г. В. Бережкова. — М.: Госиздат, 1969. — 158 с.
5. Kirchner, H. P. Article [Text] / H. P. Kirchner // J. Amer. Ceram. Soc. — 1963. — Vol. 46. — P. 299.
6. Piper, W. W. [Text] / W. W. Piper // Phys. Rev. — 1953. — Vol. 52. — P. 503.
7. Hobbs, H. H. Article [Text] / H. H. Hobbs // Rev. Scient Instrum. — 1959. — Ser. 2. — P. 653.
8. Dombrowska-Gavda, H. Article [Text] / E. Rafalovich, Ch. Sulkovski // Acta phys. polon. — 1963. — Vol. 23. — P. 663.
9. Сандулова, А. В. Статья [Текст] / А. В. Сандулова, И. И. Марьямова, Ю. И. Загонич // Физика твердого тела. — 1965. — № 7. — С. 1581.
10. Исаева, Р. В. Статья [Текст] / Р. В. Исаева // ЖЭТФ. — 1966. — № 4. — С. 311.
11. Mazur, Ju. Article [Text] / Ju. Mazur, Ja. Pentkovska, E. Rafalovich, V. Zaharko // Acta phys. polon. — 1963. — Vol. 24. — P. 3.
12. Katahiro, I. J. Article [Text] / I. Katahiro, A. Watanabe, H. Sasaki // Phys. Soc. Japan. — 1966. — Vol. 21. — P. 196.
13. Piper, W. W. Article [Text] / W. W. Piper, W. L. Roth // Phys. Rev. — 1953. — Vol. 92. — P. 503.
14. Gershenson, M. J. Article [Text] / M. Gershenson, R. M. Mikulyak // Electrochem. Soc. — 1961. — Vol. 108. — P. 548.
15. Skove, M. J. Article [Text] / M. J. Skove, E. P. Stillwell // Appl. Phys. Letters. — 1965. — № 7. — P. 241.
16. Ison, A. Article [Text] / A. Ison, R. V. Coleman // Phys. Rev. — 1965. — Vol. 137. — P. 1609.
17. Davis, J. H. Article [Text] / J. H. Davis, M. J. Skove, E. P. Stillwell // Solid State Commun. — 1966. — Vol. 4. — P. 597.

18. Dheer, P. N. Article [Text] / P. N. Dheer // Bull. Amer. Phys. Soc. — 1964. — Vol. 9. — P. 550.
19. Dragsdorf, R. D. J. Article [Text] / R. D. Dragsdorf, J. C. Crawford // Appl. Phys. — 1962. — Vol. 7. — P. 439.
20. Dragsdorf, R. D. J. Article [Text] / R. D. Dragsdorf, J. C. Crawford // Appl. Phys. — 1965. — Vol. 36. — P. 1934.
21. Dragsdorf, R. D. J. Article [Text] / R. D. Dragsdorf, J. C. Crawford // Appl. Phys. — 1965. — Vol. 36. — P. 2766.
22. Drum, C. M. Article [Text] / C. M. Drum // Philos. Mag. — 1966. — Vol. 13. — P. 1239.

*Abstract. The results of studies of electrical and structure-sensitive properties of various groups of whiskers are considered, the effect of the electrical properties on the whisker structure is shown, the results of studies of occurrence of the charged layers on the whisker surface is analyzed.*

*Analysis of literature data suggests that there no so many research papers and publications, specifically devoted to the study of the electrical properties of metallic whiskers.*

*There is also an obvious deficiency in contemporary publications, although some authors considered promising application areas of «whiskers» taking into account the impact of their characteristics on the development of specific research areas.*

*The issues of implementing new processing technologies of whiskers, the possibilities of creating biocompatible materials on their basis are analyzed and discussed in some publications.*

*In thesis works, the properties of whiskers as nanomaterials are investigated, physical properties of single crystals are considered in depth and special attention is paid to the optical properties.*

*Almost all researchers noted and note that the electrical properties of whiskers are predetermined by an ideal crystal lattice structure, the presence of defects on the surface and possible presence of trace impurities.*

*Eventually, accounting and justification of a particular group of whiskers properties will allow not only obtaining high-quality products, but also fulfilling human and environmental protection requirements.*

*Keywords: whiskers, electrical properties, polarization, electrical conductivity, electrical resistance, ferroelectric, electrostatic charge.*