

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.9

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.012

## СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКИХ КРЕМНИЕВЫХ ПЛЁНОК И ИХ ЛОКАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Анна Алексеевна Мальцева<sup>1</sup>, Владимир Александрович Плотников<sup>2</sup>, Сергей Викторович Макаров<sup>3</sup>

<sup>123</sup>ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Барнаул, пр. Ленина, 61

<sup>1</sup>e-mail: annamaltseva2k@mail.ru, ORCID - нет

<sup>2</sup>e-mail: plotnikov@phys.asu.ru, ORCID – 0000-0001-7051-1082

<sup>3</sup>e-mail: makarov@phys.asu.ru, ORCID - /0000-0003-1323-4343

**Аннотация.** Методом конденсации из парогазовой фазы, полученной резистивным испарением кремния в вакууме, были изготовлены тонкие пленки кремния на подложках из силикатного стекла с подслоем меди. Структурное состояние пленок было изучено сканирующей зондовой микроскопией с помощью проводящего зонда. Анализ поверхностного рельефа свидетельствует о высоком качестве пленки, среднее отклонение z-составляющей пленки на медном подслое составляет около 7 нм. А на подложках из силикатного стекла – 1,34 нм. Тонкие кремниевые пленки могут иметь различное структурное состояние в зависимости от метода их получения и условий, при которых происходит их формирование. В нашем случае структурное состояние как кремниевых пленок, так и медного подслоя является кластерным. Это следует из распределения структурных составляющих по размерам.

Кластеры состоят из небольшого числа атомов и обычно имеют размеры от долей до нескольких нанометров, что приводит к существенному изменению электронной подсистемы, связанной с локализацией электронов и появлением энергетических уровней как в валентной, так и в зоне проводимости и расширение энергетической щели между ними. Такие изменения электронной подсистемы существенно сказываются на электрофизических и оптических свойствах пленок, например, наблюдается увеличение энергии электронов для перехода с одного уровня на другой, что приводит к туннелированию электронов.

Туннелирование электронов сказывается на их транспортных свойствах. Исследование локальной проводимости было осуществлено с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Установлены, что в медном подслое и в гибридной структуре Cu/Si наблюдаются нелинейные вольт-амперные зависимости с выраженным участком так называемого «нулевого тока». Наличие такого участка на вольт-амперной зависимости свидетельствует о туннелировании электронов, а ширина этого участка характеризует энергию для совершения туннельного перехода как в самом кластере, так и между смежными. Проводимость же кремниевой пленки на стеклянной подложке отсутствует, что может свидетельствовать о диэлектрических свойствах пленки.

**Ключевые слова:** тонкие кремниевые пленки, гибридные тонкопленочные структуры, кластерная структура тонких пленок, вольт-амперные зависимости, туннелирование электронов

---

**Для цитирования:** Мальцева А.А., Макаров С.В., Плотников В.А. Структурное состояние тонких кремниевых плёнок и их локальная проводимость // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 1. С. 116–122. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.012.

---

Original article

**THE STRUCTURAL STATE OF THIN SILICON FILMS AND THEIR LOCAL CONDUCTIVITY****Anna A. Maltseva<sup>1</sup>, Sergei V. Makarov<sup>2</sup>, Vladimir A Plotnikov<sup>3</sup>**

Altai state university, Barnaul, Lenin Avenue, 61

<sup>1</sup> e-mail: annamaltseva2k@mail.ru, ORCID - нет<sup>2</sup> e-mail: plotnikov@phys.asu.ru, ORCID - 0000-0001-7051-1082<sup>3</sup> e-mail: makarov@phys.asu.ru, ORCID - /0000-0003-1323-4343

**Abstract.** Thin silicon films on silicium glass substrates with a copper sublayer were produced by condensation from the vapor-gas phase obtained by resistive evaporation of silicon in vacuum. The structural state of the films was studied by scanning probe microscopy using a conductive probe. The analysis of the surface relief indicates the high quality of the film, the average deviation of the z-component of the film on the copper sublayer is about 7 nm. And on silicium glass substrates – 1.34 nm. Thin silicon films can have a different structural state depending on the method of their preparation and the conditions under which their formation occurs. In our case, the structural state of both silicon films and the copper sublayer is cluster-like, which follows from the size distribution of the structural components

Clusters consist of a small number of atoms and usually have sizes from fractions to several nanometers, which leads to a significant change in the electronic subsystem associated with the localization of electrons and the appearance of energy levels in both the valence and conduction bands and the expansion of the energy gap between them. Such changes in the electronic subsystem significantly affect the electrophysical and optical properties of films, for example, there is an increase in the energy of electrons to transition from one level to another, which leads to electron tunneling.

Electron tunneling affects their transport properties. The study of local conductivity was carried out using scanning probe microscopy. It is established that nonlinear volt-ampere dependences with a pronounced section of the so-called "zero current" are observed in the copper sublayer and in the Cu/Si hybrid structure. The presence of such a section on the volt-ampere dependence indicates electron tunneling, and the width of this section characterizes the energy for making a tunnel transition both in the cluster itself and between adjacent ones. The conductivity of the silicon film on the glass substrate is absent, which may indicate the dielectric properties of the film.

**Keywords:** thin silicium films, hybrid thin-film structures, cluster structure of thin films, volt-ampere dependencies, electron tunneling.

**For citation:** Maltseva A.A., Makarov S.V., Plotnikov V.A. (2025). The structural state of thin silicon films and their local conductivity. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(1), 116–122. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.012.

**Введение**

Кремний относится к полупроводниковым материалам и широко используется в современной электронике в качестве тонкопленочной составляющей сложных гетероструктур. В этой связи к структуре поверхности кремниевых слоев уделяется особое внимание, что обусловлено влиянием этой структуры на электрофизические свойства интерфейса Si/Cu. В связи с тем, что наши пленки имеют кластерное строение, где размер кластера может быть 1 – 4 нм, то их электрофизические свойства существенно отличаются от свойств макроскопического материала [1]. Например,

электроны, металлического кластера формируют дискретные энергетические уровни. Появление дискретных электронных полос приводит к туннелированию электронов, что обуславливает нелинейность вольт-амперных зависимостей.

В полупроводниковых кластерах появление дискретных уровней в валентной зоне и зоне проводимости приводит к расширению энергетической щели между ними и требует увеличения энергии электрона для перехода с одного уровня на другой [1]. При этом ширина энергетической щели может стать больше кинетической энергии электрона кТ, что способствует туннелированию электронов.

Ограничение состояний электронов в кластерах сопровождается появлением особых электрофизических свойств тонких пленок, сформированных нанокластерами, например, превращение металлов и полупроводников в диэлектрики. В металлических пленках толщиной до 100 нм проводимость может быть на несколько порядков меньше проводимости объемного материала. Такой эффект экспериментально наблюдали в нанокристаллических пленках кобальта [2]. В тонких пленках алюминия, имеющих аморфную или мелкокристаллическую структуру, также наблюдается увеличение удельного сопротивления по сравнению с удельным сопротивлением массивных образцов. Этот эффект связывают с уменьшением концентрации свободных электронов и локализацией электронов на слабосвязанных кластерах, а также с уменьшением длины свободного пробега и с увеличением числа дефектов и границ между кристаллитами [3]. В алюминиевых пленках толщиной 20 нм удельное сопротивление составляет  $\rho = 2.9 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и только в пленках толщиной более 300 нм удельное сопротивление приближалось к табличному значению в алюминии -  $2.6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

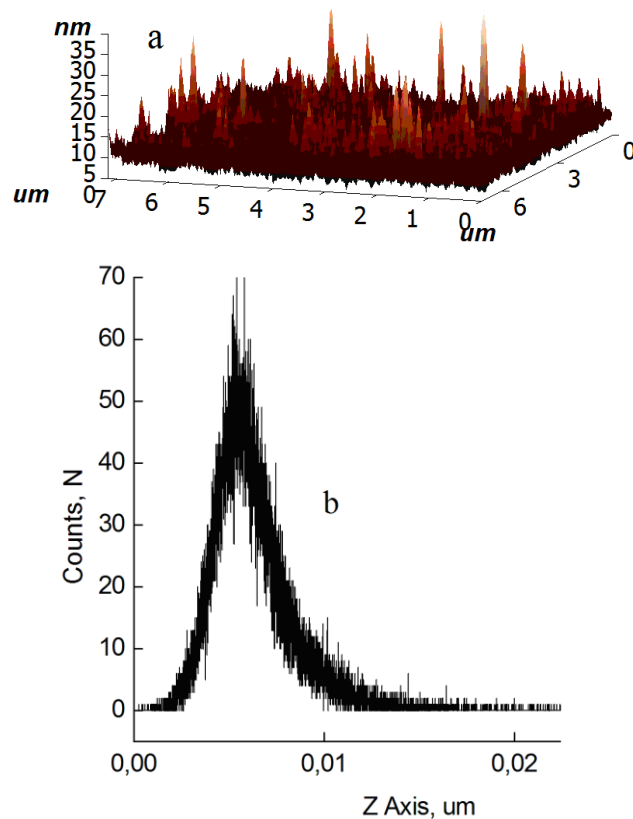
### Экспериментальные методики

Тонкие медные и кремниевые пленки были получены в вакууме (остаточное давление  $10^{-5} \text{ torr}$ ) путем конденсации вещества из парогазовой фазы, полученной резистивным испарением медных и кремниевых заготовок, на подложки из силикатного стекла. Бинарные пленки Cu/Si были получены последовательным испарением и конденсации сначала меди, а затем кремния. То есть интерфейс Cu/Si содержал минимальное количество кислорода.

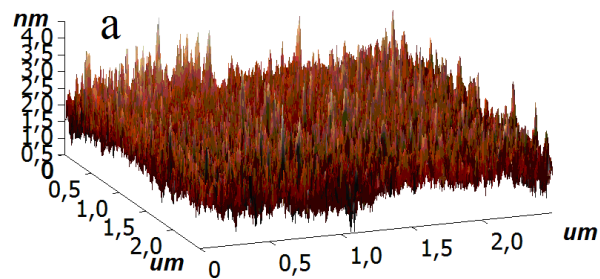
Исследования структурного состояния поверхности и локальной проводимости проводили с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver Next, для чего использовали проводящий зонд. Локальные вольт-амперные зависимости представляли собой зависимости тока растекания от напряжения между зондом и медным подслоем.

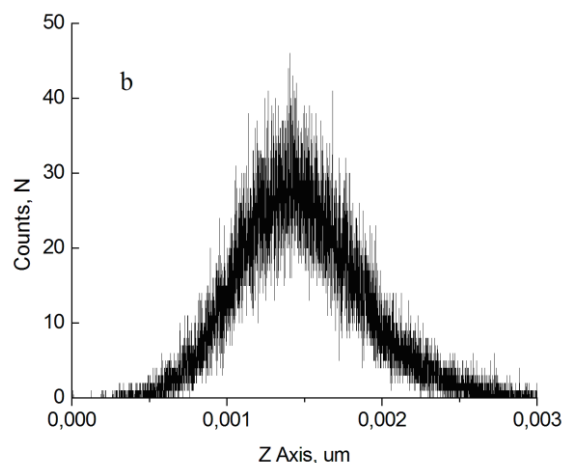
### Результаты экспериментов и обсуждение

Структура поверхности пленок и распределение высот структурных составляющих (Z-отклонений от идеальной поверхности пленок) приведены на рис. 1, 2, 3.

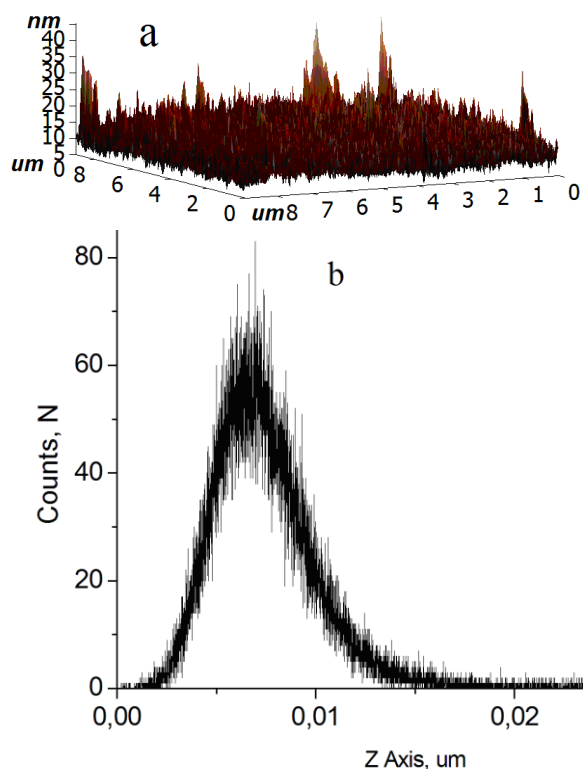


**Рис. 1.** Структура поверхности тонкой медной пленки (а), используемой в качестве проводящего электрода для тонкой кремниевой пленки. Распределение Z-отклонений пленки с максимумом около 4,58 нм свидетельствует о высоком качестве поверхности (б).





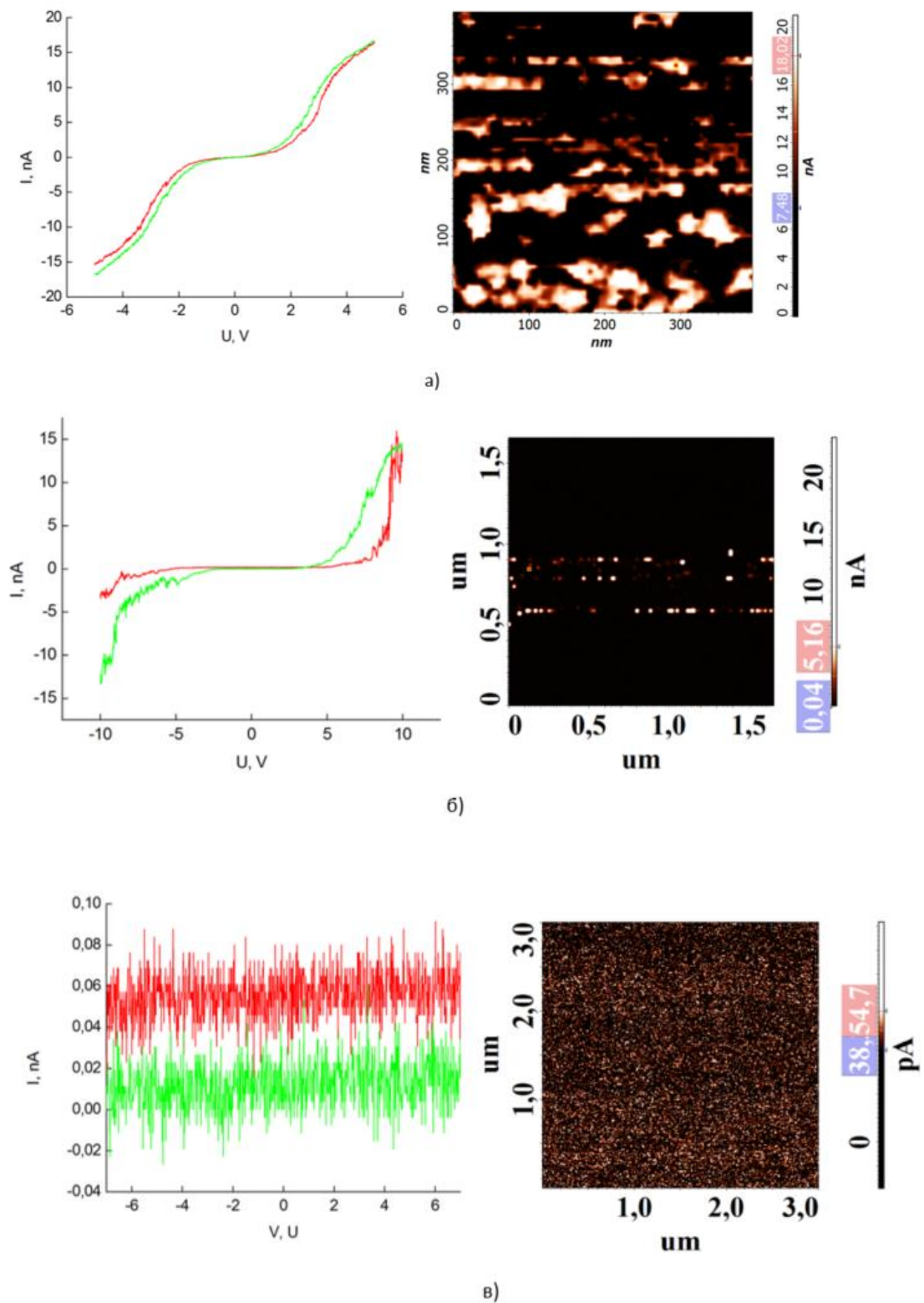
**Рис. 2.** Структурное состояние поверхности тонкой кремниевой пленки, сконденсированной на аморфной подложке из силикатного стекла (а). Распределение Z-отклонений пленки с максимумом около 1,34 нм свидетельствует об атомно-гладкой структуре поверхности (б).



**Рис. 3.** Структура поверхности тонкой кремниевой пленки, сконденсированной на медный подслое (а). Распределение Z-отклонений в Cu/Si пленке с максимумом около 7,0 нм свидетельствует о высоком качестве поверхности (б).

Приведенные на рис. 1, 2 и 3 данные по структуре поверхности пленок свидетельствуют о ее высоком качестве. Средняя величина распределение Z-отклонений в медной пленке на силикатной подложке составила около 4,58 нм, а в кремниевой пленке – около 1,34 нм. Средняя величина распределение Z-отклонений в бинарной Si/Cu пленке составила около 7,0 нм. То есть в кремниевой пленке поверхность пленки является атомно гладкой, а в бинарной пленке, очевидно, наблюдается влияние структуры поверхности первого медного подслоя на структуру кремниевого слоя.

Отметим, что у таких пленок удельная проводимость меньше, чем у макроскопических образцов. Это, как уже было показано, связано с уменьшением концентрации свободных электронов, длины свободного пробега, увеличением числа дефектов и границ между кристаллитами [3]. На рис. 4 представлены локальные вольт-амперные зависимости пленки меди, бинарной пленки Cu/Si и пленки кремния.



**Рис. 4.** Локальные вольт-амперные зависимости тонких пленок: а – вольт-амперные зависимости медного подслоя; б – вольт-амперные зависимости бинарной пленки Cu/Si; в – вольт-амперные зависимости кремниевой пленки.

Из приведенных на рис. 4 локальных вольт-амперных зависимостей следует, что в медном подслое и в бинарной Si/Cu тонкой гибридной пленке вольт-амперные зависимости имеют нелинейный вид, а в кремниевой тонкой пленке проводимость отсутствует. Как было показано для металлических пленок, в том числе и для поликристаллических пленок Co, проводимость обусловлена туннелированием электронов проводимости через граничные потенциалы, с учетом возможного понижения плотности носителей заряда при уменьшении размеров кристаллитов [1-4]. Когда размеры кристаллитов становятся меньше длины свободного пробега электронов, то часть этих носителей локализуется. При этом локализация оказывает более сильное влияние на электропроводность, чем увеличение рассеяния на границах, дефектах и примесях [2].

Таким образом, кластерная структура пленок существенно сказывается на их электрофизических свойствах, суть которых, по-видимому, связаны с одноэлектронными туннельными переходами, если джозефсоновское туннелирование отсутствует [5]. Одноэлектронное туннелирование требует преодоление энергетического барьера, связанного с накоплением электрического заряда на изолированном кластере, меняющим кулоновскую энергию на величину, равную примерно  $e^2/2C$  ( $C$  – емкость перехода,  $e$  – заряд электрона) [5,6]. Дополнительным аргументом в пользу одноэлектронного туннелирования могут выступать осцилляции на локальных вольт-амперных зависимостях [6]. Осцилляции локальной проводимости через изолированный кластер свидетельствуют о существовании локального энергетического барьера, требующего для переноса элементарного заряда совершения работы, равной электростатической энергии.

### Заключение

Проведенный анализ структуры и локальной проводимости тонких пленок Cu, Si и Si/Cu свидетельствует, что кластерное структурное состояние определяет нелинейность локальных вольт-амперных зависимостей, обусловленное туннелированием электронов в токовом канале, сформированном цепочкой кластеров.

### Список литературы

1. Суздаев И.П., Суздаев П.И. Нанокластеры и нанокластерные системы. Организация, взаимодействие, свойства. Успехи химии, 70, (3), 2001.
2. Фролов. Исследование электропроводности в нанокристаллических пленках кобальта. ФТТ, 38, 1208 (1996)
3. М.А. Тарасов, А.М. Чекушкин, М.Ю. Фоминский, Д.М. Захаров, А.А. Ломов, О.В. Девицкий, А.А. Гунбина, Е.Т. Сохина, В.С. Эдельман Сверхпроводящие пленки и туннельные переходы на основе алюминия. Физика твердого тела, 2022, том 64, вып. 10, с. 1369-1372. DOI: 10.21883/ФТТ.2022.10.53075.35НН
4. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, №4, с. 385-410.
5. Д.В. Аверин, К.К. Лихарев. Когерентные колебания в туннельных переходах малых размеров // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. С. 733-783.
6. Голубок А.О. и др. Сканирующая туннельная микроскопия пленок аморфного углерода, модифицированного медью // ФТП. 2000. Т. 34. №2. С. 223-226.

### Информация об авторах

*А.А. Мальцева, студентка магистратуры кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия; [annamaltseva2k@mail.ru](mailto:annamaltseva2k@mail.ru)*  
*В.А. Плотников, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия; [plotnikov@phys.asu.ru](mailto:plotnikov@phys.asu.ru)*  
*С.В. Макаров, доктор физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия; [makarov@phys.asu.ru](mailto:makarov@phys.asu.ru)*

**References**

1. Suzdalev I.P., Suzdalev P.I. Nanoclusters and nanocluster systems. Assembling, interactions and properties // *Russian Chemical Reviews*. 2001, 70(3):177-210.
2. Frolov G.I., Zhigalov V.S., Pol'skii A.I., Pozdnyakov V.G. Investigation of electrical conductivity in cobalt nanocrystalline films. *Physics of the Solid State*, 1996, 38(4), 668-670.
3. Tarasov M.A., Chekushkin A.M., Fominsky M.Yu. and etc. Superconducting thin films and tunnel junctions based on aluminum. *Physics of the Solid State*, 2022, 64(10), 1352-1355.
4. Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Shchukin V.A. Kop'ev P.S. and Alferov Zh.I. Quantum dot heterostructures: fabrication, properties, lasers. *Semiconductors*, 1998, 32(4), 343-365.
5. Averin D.V., Likharev K.K. Coherent oscillations in small tunnel junctions. *Sov. Phys. JETP*, 1986, 63(2), 427-432.
6. Golubok A.O., Gorbenko O.M. and etc. Scanning Tunneling Microscopy of Films of Amorphous Carbon doped with copper. *Semiconductors*, 2000, 34(2), 217-220.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 09.11.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

The article was received by the editorial board on 09 Nov. 2024; approved after reviewing 17 Jan. 2025; accepted for publication 03 Feb. 2025.

**Information about the authors**

1. A.A. Maltseva, Graduate student of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University, 61 Lenin Ave., 656049, Barnaul, Russia; [annamaltseva2k@mail.ru](mailto:annamaltseva2k@mail.ru), <https://orcid.org/> – no
2. V.A. Plotnikov, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University, 61 Lenin Ave., 656049, Barnaul, Russia; [plotnikov@phys.asu.ru](mailto:plotnikov@phys.asu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>
3. S.V. Makarov, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University, 61 Lenin Ave., 656049, Barnaul, Russia; [makarov@phys.asu.ru](mailto:makarov@phys.asu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1323-4343>.