

УДК 548.536.537226.4

Б. А. Казаров [B. A. Kazarov]
 А. Б. Чебоксаров [A. B. Cheboksarov]

МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

METHODS OF DESCRIBING AND MODELING THE PROPERTIES OF MESOSCOPIC SYSTEMS

Северо-Кавказский федеральный университет (филиал в г. Пятигорске), Россия,
 e-mail: cheboksarov1956@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются методы описания и моделирования свойств новых наноструктурных материалов, которые содержат системы и структуры с размерами от десятков до тысяч ангстрем (или 1–100 нм). Для таких систем характерны квантовые интерференционные эффекты: гигантское усиление диэлектрической проницаемости (ДП), аномальная электропроводность, гигантское тепловое сопротивление и др. Эти явления относятся к новой, существующей 20–25 лет, области физики низкоразмерных и наноструктурных систем (мезоскопической физике).

Материалы и методы. Для понимания электрофизических свойств карбидокремниевой керамики большой интерес для исследователей представляет изучение поведения диэлектрической проницаемости в системе SiC-AlN, а также теплопроводности кристаллов триглицинсульфата.

В настоящей работе представлены результаты применения методов функций Грина и формул Кубо-Гринвуда для математического моделирования и описания новых свойств мезоскопических систем (наноструктурированных материалов, широкозонных полупроводников). В рамках предложенного подхода получены модели, выполнены расчеты и представлена интерпретация аномальных эффектов в полупроводниковых материалах твердотельной микроэлектроники.

Результаты. Анализа важных свойств и мезоскопических эффектов в широкозонных полупроводниковых материалах конкретных систем позволяют надеяться, что предложенный подход и методы применимы для описания широкого ряда свойств в наноструктурированных и мезоскопических материалах. В работе проведены расчеты температурной зависимости теплопроводности $K(T)$ для кристаллов триглицинсульфата (ТГС) и показано [1-2], что аномальное поведение кривой $K(T)$ около T_c в кристаллах ТГС связано с достаточно узким интервалом температур, в котором ярко выражены критические флуктуации в одноосных кристаллах ТГС.

Закключение. Несмотря на достигнутые успехи в изучении структурных, упругих, тепловых, электрических свойств керамики на основе SiC, особенности поведения диэлектрических свойств карбидокремниевой керамики недостаточно изучены. В этом отношении следует отметить малое количество работ, направленных на теоретическое исследование, моделирование и интерпретацию эффекта гигантского усиления диэлектрической проницаемости систем SiC-AlN, а также других композиционных материалов [1–5].

Ключевые слова: наноструктурный материал, диэлектрическая проницаемость, наноразмерные твёрдые растворы.

Abstract. This article discusses methods for describing and modeling the properties of new nanostructured materials that contain systems and structures with sizes from tens to thousands of angstroms (or 1-100 nm). For such systems, the characteristic quantum interference effects: giant enhancement of the dielectric permittivity, abnormal conductivity, a giant heat resistance, etc. These phenomena belong to a new, existing 20-25 years, the field of physics of low-dimensional and nanostructured systems (mesoscopic physics).

Materials and methods. To understand the electrophysical properties of silicon carbide ceramics, it is of great interest for researchers to study the behavior of dielectric permittivity in the SiC-AlN system, as well as the thermal conductivity of triglycin sulfate crystals.

In the present work shows the application of methods of dynamic green functions (MDFG) and formulas of the type Kubo-Greenwoods modeling and description of the properties of mesoscopic systems (nanostructured materials, wide band gap semiconductors). Within the framework of the presented approach, models are proposed, calculations are carried out and interpretation of a number of anomalous effects in wide-band materials of power electronics is given.

Results. The results of calculations of properties and mesoscopic effects in wide-band semiconductors and nanostructured materials of specific systems allow us to hope that the approach of MDF and formulas of the Kubo-Greenwood type are applicable to describe a wide range of properties in nanostructured and mesoscopic materials. In this work the calculations of the dependence of the thermal conductivity $K(T)$ for crystals of triglycinsulfate (TGS) and are shown [1-2] that the anomalous behavior of the curve $K(T)$ near T_c in TGS crystals due to the rather narrow temperature range, which pronounced critical fluctuations in uniaxial crystals of TGS.

Conclusion. *Despite the progress made in the study of structural, elastic, thermal, electrical properties of SiC-based ceramics, the behavior of the dielectric properties of silicon carbide ceramics has not been sufficiently studied. In this regard, it should be noted a small number of works aimed at theoretical research, modeling and interpretation of the effect of a giant increase in the dielectric constant of SiC-AlN systems, as well as other composite materials [1-5].*

Key words: nanostructured material, dielectric permeability, nanoscale solid solutions.

В физике конденсированного состояния и статистической физике исследуют в основном свойства систем на макроскопическом уровне, используя при этом термодинамический предел, предполагающий, что объем Ω и число частиц N в системе стремятся к бесконечности при постоянном значении плотности $n = N/\Omega$ [5]. Это приближение дает возможность определить большое количество «объемных» характеристик системы. Обычно систему можно считать макроскопической, если ее размер много больше некоторой характерной корреляционной длины или, говоря более точно, всех таких длин. Как правило, длина ξ является микроскопической величиной, имеющей порядок среднего расстояния между частицами $n^{-1/3}$, однако в некоторых случаях (например, в окрестности точки фазового перехода второго рода) корреляционная длина может стать очень большой, и тогда поведение системы отличается от макроскопического в широком диапазоне размеров [5].

Исследование систем промежуточного – между микроскопическим и макроскопическим – размера (такой размер часто называют «мезоскопическим» – термин, введенный Ван Кампеном в 1981 г.) представляет интерес не только для выяснения, каким образом достигается термодинамический предел при последовательном увеличении размера системы от молекулы до массивного образца. Фундаментальные принципы квантовой механики совершенно необходимы для объяснения свойств мезоскопических систем, так как процессы термализации и неупругого рассеяния идут в них очень медленно, и поэтому фаза волновой функции играет важнейшую роль.

Методы корреляционных функций и формулы Кубо-Гринвуда применяются для вычисления усредненных двухчастичных функций Грина [1-3], что необходимо для оценки влияния разупорядоченности на электропроводность и решеточную теплопроводность.

На микроскопическом уровне наиболее эффективным и наглядным способом исследования кинетических свойств мезоскопических систем в настоящее время является метод динамических двухвременных функций Грина (МДФГ), компоненты Фурье которых по определению имеют вид [3,4]:

$$G_{AB}(\omega) = \omega \langle\langle A|B \rangle\rangle_{\omega} = \langle[A, B]_{\eta}\rangle - \langle\langle A|[B, H] \rangle\rangle_{\omega} \quad (1)$$

В случае термического возмущения, обусловленного наличием отклонений от температуры $\nabla_{\alpha}T$ в системе возникает поток тепла Q_{α} за счет движущей «внешней» силы $X_{\alpha} = \nabla_{\alpha}\beta$. Согласно теории линейной реакции для коэффициента теплопроводности $\kappa_{\alpha\beta} = L_{\alpha\beta}$ в данном случае получаем [1-3]:

$$\kappa_{\alpha\beta}(T) = \frac{1}{V\beta} \int_0^{\infty} e^{-\sigma t} dt \int_0^{\beta} d\lambda \langle Q_{\alpha}(0) Q_{\beta}(t + i\lambda) \rangle \quad (2)$$

В работах [1, 2] показано, что для гармонического кубического кристалла с дефектами (примесями, нанокластерами) справедливо точное соотношение (обозначения см. в [1, 2]):

$$\kappa_{\alpha\beta}(T) = \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \lambda(T) = \frac{\delta_{\alpha\beta}}{6\pi V} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hbar^2 \omega^2}{k_B T^2} n(\omega) [n(\omega) + 1] \Im p |\Pi(\omega)|^2 d\omega \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \Pi^p(ee'_i\omega) &= \sum_{\alpha} Q^p(ee^{\alpha}) \text{Im} G(e^{\alpha} e'_i\omega), \\ \text{Im} G(ee'_i\omega) &= \pi \sum_j \psi(e_i j) \psi^*(e'_j) \delta(\omega_j^2 - \omega^2), \end{aligned} \quad (4)$$

Формулы (3), (4) использованы в работе при анализе поведения теплового сопротивления в одноосных кристаллах ТГСс фазовым переходом [1-2].

Ниже приведены результаты применения методов динамических функций Грина и обобщенных формул типа Кубо-Гринвуда анализу температурного поведения и моделированию теплофизических свойств некоторых конкретных полупроводниковых наноструктурированных материалов (мезоскопических систем).

В случае кубического кристалла выражение (3) несколько упрощается, а функции Грина $D(\omega)$ при хаотически распределенных примесях можно по методу Т-матрицы рассеяния вычислить аналитически. Тогда:

$$K(T) = \frac{1}{6\pi k_B} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hbar^2 \omega^2}{T^2 \Omega} n(\omega) [n(\omega) + 1] S_p | \Pi(\omega) |^2 d\omega \quad (5)$$

При этом в дебаевской модели кристалла с плотностью квадратов частот $\rho(\omega^2) = 3\omega / \omega_d^2$, но со временем релаксации $\tau(\omega)$, учитывающим микроскопическое строение дефектов, примесей и нанокластеров, теплопроводности широкозонных полупроводников $K(T)$ согласно (2), (3), (4) можно представить в виде [1–3]:

$$K(T) = \frac{1}{2\pi^2 v} \int_0^{\omega_d} \hbar \omega^3 \tau(\omega) \cdot \frac{\frac{\hbar \omega}{k_b T} e^{\frac{\hbar \omega}{k_b T}}}{\left(e^{\frac{\hbar \omega}{k_b T}} - 1 \right)^2} d\omega \quad (6)$$

С использованием (6) в работе проведены расчеты зависимости $K(T)$ для кристаллов ТГС и показано [1–2], что anomальное поведение кривой $K(T)$ около T_c в кристаллах ТГС связано с достаточно узким интервалом температур, в котором ярко выражены критические флуктуации в одноосных кристаллах ТГС (рис. 1).

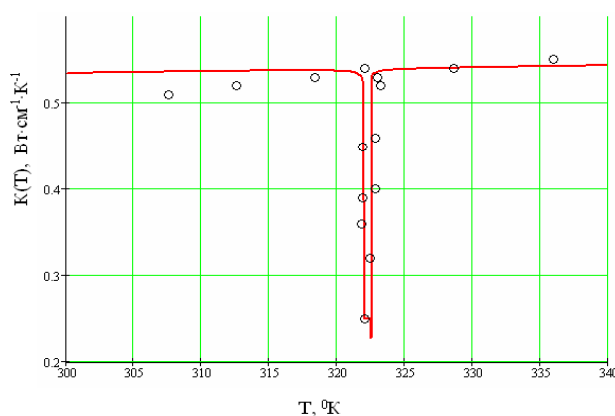


Рис. 1. Температурное поведение теплопроводности высококачественных кристаллов ТГС около $T_c = 322^0 K$ в направлении [001] [1–2]

В экспериментах, приборах с проводящими мезоскопическими системами используются следующие три класса проводников:

1. Металлы. Они имеют высокую концентрацию носителей заряда ($\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$) и широкий диапазон изменения степени чистоты и длины свободного пробега. Многие металлы становятся сверхпроводниками при низких температурах, что приводит к дополнительным интересным явлениям.

2. Полупроводники. Здесь концентрация и тип носителей заряда может контролируемым образом изменяться в пределах $10^{15}–10^{19} \text{ см}^{-3}$, что достигается добавлением примесей, оптическим возбуждением или использованием электростатических затворов. Специальными методами можно достигать высокой подвижности носителей, а также устраивать гетероконтакты – поверхности контакта двух различных полупроводников. Такие гетероконтакты могут обладать необычными свойствами.

3. Полуметаллы. Они используются в некоторых специальных случаях. Они имеют промежуточную концентрацию носителей заряда ($10^{19}–10^{20} \text{ см}^{-3}$), причем носителями одновременно являются и электроны, и дырки. В некоторых полуметаллах (особенно в висмуте, где впервые были обнаружены многие квантовые осцилляционные эффекты) длина свободного пробега при низких температурах может достигать чрезвычайно больших (практически макроскопических) значений.

Для создания низкоразмерных проводящих систем необходимо приготовление образцов, поперечные размеры («толщина») которых гораздо меньше продольных. Пленки, включая очень тонкие, можно получать стандартными методами нанесения покрытий (испарением или напылением), которые применимы для изготовления как изолирующих, так и проводящих слоев. В настоящее время высококачественные полупроводниковые системы, в том числе двумерные, изготавливаются путем последовательного выращивания отдельных слоев кристаллической решетки с очень жестким контролем параметров. Таким образом, на современном уровне развития технологии возможно изготовление очень многих мезоскопических структур с подобным разрешением. Пример

наноструктуры [5], изготовленной с помощью электронного пучка, показан на рис. 2. Модификацией обычного сканирующего электронного микроскопа можно достичь разрешения выше 500 Å для однослойных структур.

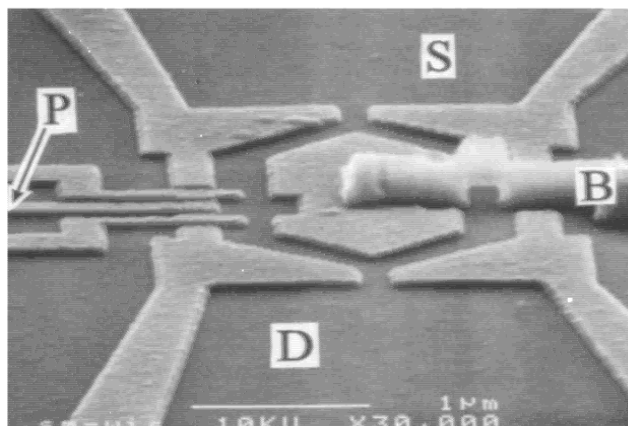


Рис. 2. Пример наноструктуры, созданной электронным пучком и предназначенной для изучения интерференции электронов в кольцевой геометрии

Электроны проходят из источника S в сток D, расположенный в двумерном электронном газе (темная область), через два рукава кольца, образованного электростатическими затворами (более светлая область). Два (необозначенных) тонких затвора образуют в левом рукаве кольца квантовую точку (затворы отделяют точку от рукава). Управляющий затвор P предназначен для регулирования электростатического потенциала квантовой точки. Дополнительный затвор B управляет потенциалом центральной области (дыры в проводящем кольце), контролируя тем самым ширину рукавов. Этот затвор выходит наружу через «воздушный мост», проходящий на более высоком уровне (т. е. в другом слое) во избежание контакта с нижним затвором. Совмещение структур на двух уровнях, необходимость в котором возникла при создании этой системы, оказалось непростой технологической задачей. В эксперименте исследовались интерференционные осцилляции в зависимости от напряжения на управляющем затворе P и/или от магнитного поля, пронизывающего кольцо [104]. В работе [104] было продемонстрировано, что когерентность электронов, резонансно туннелирующих через квантовую точку, сохраняется в течение времени порядка 3 нс.

Как бы впечатляющи ни были данные методы, необходимо признать, что получающиеся структуры еще весьма далеки от идеала. Например, проволока толщиной несколько сотен ангстрем, полученная травлением, как правило, имеет очень неровные края, что вызывает сильное диффузное рассеяние электронов. Это рассеяние значительно понижает их подвижность, особенно в полупроводниковых системах.

Одним из способов избежать этих неприятностей является создание полупроводниковых структур с помощью электростатических затворов. При большом отрицательном напряжении затвор может вызвать истощение двумерного электронного газа непосредственно под собой, а также (за счет полей рассеяния) в небольшой прилегающей области. В результате между двумя такими затворами формируется узкий канал, ширина которого может немного варьироваться при изменении напряжения на затворах. Оказывается, что электростатические эффекты имеют тенденцию к сглаживанию микроскопических нерегулярностей на краях затвора, что позволяет создавать каналы с хорошей подвижностью.

Таким способом можно делать высококачественные каналы с шириной вплоть до нескольких длин волн. Получение более узких одномерных каналов требует привлечения других методов. Недавно новая одномерная структура была получена при помощи MOCVD метода выращивания внутри желобка на поверхности подложки. Другая полезная ростовая техника – техника скалывания избыточно выращенных краев: *cleaved edge overgrowth*. Наилучшего разрешения, порядка атомного, можно достичь с помощью метода, использующего сканирующий туннельный микроскоп. В этом методе достигнута столь высокая степень совершенства, что для создания требуемой структуры по подложке могут, при необходимости, контролируемым способом перемещаться отдельные атомы (рис. 3).

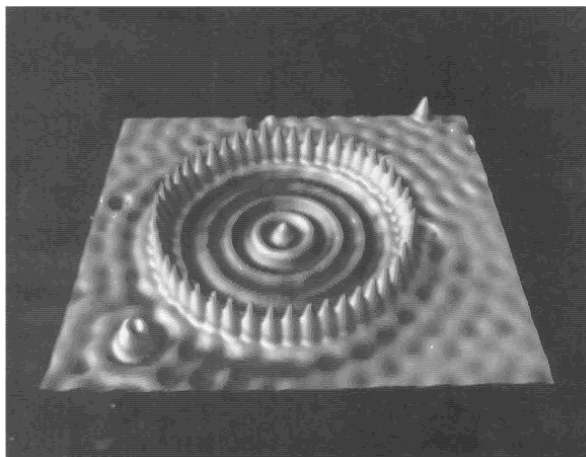


Рис. 3. «Квантовый коралл», демонстрирующий возможности методов, использующих сканирующий туннельный микроскоп [5]

Кольцо из 48 атомов железа с радиусом порядка 140 А было сделано на поверхности меди [5]. Измерения радиальных колебаний высоты были сделаны с помощью той же техники. Эти концентрические волны, прекрасно видны на рисунке, они возникают как собственные квантовые состояния коралла и демонстрируют почти идеальное качество поверхности внутри кольца.

Аналогичная технология используется для осуществления контакта со структурой с целью проведения на ней разнообразных измерений, что, в принципе, позволяет приблизиться к микроскопическому пределу мезоскопии [5]. Поскольку данный метод работает очень медленно и имеет дело с индивидуальными образцами, в настоящее время прикладываются усилия для его автоматизации и увеличения быстродействия.

В мире современных наноструктурированных материалов значительная роль принадлежит керамике. Это обусловлено широким диапазоном ее многообразных физических и химических свойств. Большой интерес исследователей к конструкционной и функциональной керамике объясняется возможностью получения новых перспективных материалов с прогнозируемыми свойствами. По отношению к металлам керамические материалы обладают более высокими механическими характеристиками, высокой коррозионной и радиационной устойчивостью, стабильностью свойств в широком интервале температур, что обеспечивает долговечность керамических конструкций в агрессивных средах [1–6].

Объем производства керамических материалов во всем мире стремительно растет. В настоящее время основными производителями таких материалов являются США, Япония, Китай, Германия и Россия. Керамика на основе SiC характеризуется большим потенциалом для широкого использования в качестве носителей катализатора, теплообменников, фильтров горячих газов, применения в установках для сжигания газов, в качестве конструкционного материала для высокотемпературных устройств [1]. В настоящее время широко производятся следующие виды карбидокремниевой керамики:

- Керамика со связкой на основе нитрида кремния (SNBSiC, NBSiC или NBSC), которую получают, используя смесь гранул карбида кремния и кремния.

- Реакционно-связанная керамика (RBSiC, RBSC, SiSiC или SiSC) изготавливается из смеси гранул карбида кремния и мелких порошков графита и кремния [1–4].

- Керамика, получаемая прямым синтезом (DSSiC, DSSC), изготавливается гидросмесь из субмикронных порошков SiC, синтезирующих добавок бора или алюминия, различных связок и углеродных добавок, которая после сушки помещается в вакуумную печь и нагревается до температуры 2050–2175 °С.

- Композиционно-связанная керамика (CBSiC или CBSC), которую получают путем смешивания мелкого порошка карбида кремния высокой чистоты с кремнием и связывающим материалом и последующей термической обработки в атмосфере азота при температуре выше 1350°С.

- Реакционно-сформированная карбидокремниевая керамика (RFSC), для изготовления которой применяют метод реактивной инфильтрации расплавленного кремния и, при необходимости, сплавов тугоплавких металлов с кремнием в углеродных преформах.

Керамика на основе карбида кремния с нитридом алюминия представляет большой интерес в связи с существованием твердого раствора в этой системе [1–3], позволяющего получить широкий спектр материалов на ее основе.

Эксперименты по легированию керамики на основе SiC, а также по синтезу керамики на основе твердых растворов показывают, что спектр их свойств расширяется и улучшается технологичность материала [1, 2]. Так, в [1, 2] исследованы свойства керамических материалов на основе твердых растворов SiC–AlN с использованием метода резонансной ультразвуковой спектроскопии. Авторами этой работы установлено, что при концентрации 30 % AlN модули упругости незначительно завышены, коэффициент затухания заметно меньше и оптимальным для получения керамики с высокими механическими свойствами в системе SiC–AlN является состав 30–50 % (вес.) нитрида алюминия. В работах [1–4] исследованы электрофизические свойства карбидокремниевой керамики и представлены результаты разработки математических моделей, описывающих кинетику процесса образования таких материалов и учитывающих влияние технологических параметров на структуру и морфологию получаемой керамики в системе SiC – AlN.

В последнее время, наряду с рассмотренными технологиями, все большее применение для получения конструкционных керамических материалов находит метод электроимпульсного спекания. В работе [1] представлены основные особенности технологии формирования керамики системы SiC – AlN путем электроимпульсного спекания. На основе использования описанных технологических приемов, были получены опытные партии образцов высокоплотной керамики системы SiC–AlN состава 50 % вес SiC [1].

Как уже отмечалось ранее, технологии получения конструкционных материалов на основе карбидокремниевой керамики постоянно совершенствуются. Так, в [6] представлен экономичный метод получения многофункциональной профилированной керамики на основе SiC, основанный на механизме взаимодействия расплава кремния с углеродом, находящимся в заранее сформированной заготовке определённого состава и пористости. Эта технология отличается простотой, дешевизной используемого оборудования, доступностью сырья, возможностью в широких пределах заданным образом изменять структуру и состав керамики в зависимости от конкретного применения. Использование этого метода позволяет получать технические характеристики, существенно улучшенные по сравнению с керамиками из карбида кремния, присутствующими на коммерческом рынке.

В поликристаллических карбидокремниевых материалах коэффициент термического расширения зависит, в первую очередь, от фазового состава. С увеличением концентрации AlN коэффициент термического расширения поликристаллических твердых растворов возрастает.

Электрофизические свойства карбидокремниевой керамики сильно зависят от концентрации различных добавок и температуры [1–5]. Известно, что небольшие (~2 вес.%) добавки BeO приводят к появлению изолирующих свойств в керамике SiC – BeO [80], а в системе SiC – AlN [1] возможно образование непрерывного ряда твердых растворов. В связи с этим поликристаллические твердые растворы SiC – BeO и SiC–AlN являются перспективными материалами для полупроводниковой микроэлектроники.

Для понимания электрофизических свойств карбидокремниевой керамики большой интерес для исследователей представляет изучение поведения диэлектрической проницаемости в системе SiC–AlN.

Несмотря на достигнутые успехи в изучении структурных, упругих, тепловых, электрических свойств керамики на основе SiC, особенности поведения диэлектрических свойств карбидокремниевой керамики недостаточно изучены. В этом отношении следует отметить малое количество работ, направленных на теоретическое исследование, моделирование и интерпретацию эффекта гигантского усиления диэлектрической проницаемости систем SiC–AlN, а также других композиционных материалов [1–5].

Таким образом, в настоящей работе показано применение МДФГ и формул типа Кубо–Гринвадда для моделирования и описания свойств мезоскопических систем (наноструктурированных материалов, широкозонных полупроводников). В рамках представленного подхода предложены модели, проведены расчеты и дана интерпретация ряда аномальных эффектов в широкозонных материалах силовой электроники. Результаты расчетов свойств и мезоскопических эффектов в широкозонных полупроводниках и наноструктурированных материалах конкретных систем позволяют надеяться, что подход МДФГ и формул типа Кубо–Гринвадда применимы для описания широкого спектра свойств в наноструктурированных и мезоскопических материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Казаров, В. И. Алтухов, Н. В. Баландина. Моделирование и расчет тепловых, электрических свойств широкозонных полупроводников и диэлектриков (с дефектами, фазовыми переходами и нанокластерами). Георгиевск: ГТИ (Ф) СевКавГТУ, 2008. 224 с.
2. В. И. Алтухов, Б. А. Казаров, А. В. Санкин. Функциональные материалы нанoeлектроники – новые свойства и методы их описания: монография. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2011. 165с.
3. Алтухов В. И. Симметрия и структурные фазовые переходы в кристаллах. Ставрополь: СевКавГТУ, 2003. 96 с.
4. В. И. Алтухов. Основы теории кинетических свойств кристаллов с дефектами и фазовыми переходами: диэлектрики и сегнетоэлектрики. Ставрополь: СевКавГТУ, 2003. 188 с.
5. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику: пер. с англ. М.: Физматлит, 2004. 304 с.
6. Могилевский Б. М., Чудновский А. Ф. Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972. 536 с.

REFERENCES

1. B. A. Kazarov, V. I. Altukhov, N. V. Balandina. Modelirovanie i raschet teplovykh, elektricheskikh svoystv shirokozonnkh poluprovodnikov i dielektrikov (s defektami, fazovymi perekhodami i nanoklasterami). Georgievsk: GTI (f) SevKavGTU, 2008. 224 s.
2. V. I. Altukhov, B. A. Kazarov, A. V. Sankin. Funktsional'nye materialy nanoelektroniki – novye svoistva i metody ikh opisaniya: monografiya. NovoCherkassk: YuRG TU (NPI), 2011. 165 s.
3. Altukhov V. I. Simmetriya i strukturnye fazovye perekhody v kristallakh. Stavropol': SevKavGTU, 2003. 96 s.
4. V. I. Altukhov. Osnovy teorii kineticheskikh svoystv kristallov s defektami i fazovymi perekhodami: dielektriki i segnetoelektriki. Stavropol': SevKavGTU, 2003. 188 s.
5. Imri I. Vvedenie v mezoskopicheskuyu fiziku: per. s angl. M.: Fizmatlit, 2004. 304 s.
6. Mogilevskii B. M., Chudnovskii A. F. Teploprovodnost' poluprovodnikov. M.: Nauka, 1972. 536 s.

ОБ АВТОРАХ

Казаров Бениамин Агопович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра «Физики, электротехники и электроэнергетики», СКФУ, ИСТИД (филиал) в г. Пятигорске, kazarovbeniamin@mail.ru

Kazarov Beniamin Agopovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department "Physics, electrical engineering and power", NCFU, (branch) in Pyatigorsk kazarovbeniamin@mail.ru

Чебоксаров Александр Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра «Физики, электротехники и электроэнергетики», СКФУ, ИСТИД (филиал) в г. Пятигорске, cheboksarov1956@mail.ru

Cheboksarov Alexander Borisovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Physics, Electrical Engineering and Electricity, NCFU, (branch) in Pyatigorsk, E-mail: cheboksarov1956@mail.ru

Дата поступления 09.05.2018