

В.М. Юров^{1*} , В.И. Гончаренко² , В.С. Олешко² , К.Н. Жангозин¹ 

¹ТОО «ТСК Восток», г. Караганда, г. Астана, Казахстан

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

*e-mail: exciton@list.ru

КВАНТОВАЯ СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛОВ

В настоящей работе предлагается модель определения толщины поверхностного слоя металлов и квантовая структура этого слоя. Атомно-гладкий металл представляется в виде схемы: нанослой → мезослой → объемная фаза, которые отличаются друг от друга природой размерных эффектов. В объемной фазе размерного эффекта нет. Толщина поверхностного слоя металлов $R(l)$ имеет размер от 1 нм до 10 нм, кроме цезия, т.е. представляют собой наноструктуру. Показано, что уровни энергии E_n нанослоя определяются одним фундаментальным параметром – постоянной кристаллической решетки металла \dot{a} . Как только параметр \dot{a} перестает изменяться, спектр квантовых состояний переходит в непрерывный спектр.

Нанослой $R(l)$ представляет собой по E_n ступенчатую функцию, которую нетрудно привести к интегралу Лебега, играющему важную роль в квантовой теории. Квантовые нити (квантовые плоскости) в нанослое $R(l)$ можно трактовать как солитоны, краудионы, дискретные бризеры, переходящие в нанотрещины. Квантовые нити в нанослое $R(l)$ и сам нанослой можно представить как наночастицу диаметром $R(l)$ и в ней происходит предплавление ступенчатым способом. Окончательно показано, все монослои металла существенно отличаются друг от друга.

Ключевые слова: нанослой, мезослой, наноструктура, металл, квантовая структура, квантовая нить, солитон, краудион.

V.M. Yurov^{1*}, V.I. Goncharenko², V.S. Oleshko², K.N. Zhangozin¹

¹TSC Vostok LLP, Karaganda, Astana, Kazakhstan

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*e-mail: exciton@list.ru

Quantum structure of the surface layer of metals

In this paper, we propose a model for determining the thickness of the surface layer of metals and the quantum structure of this layer. An atomically smooth metal is represented as a diagram: nanolayer → mesolayer → bulk phase, which differ from each other in the nature of size effects. There is no size effect in the bulk phase. The thickness of the surface layer of metals $R(l)$ has a size from 1 nm to 10 nm, except for cesium, i.e. they represent a nanostructure. It is shown that the energy levels E_n of the nanolayer are determined by one fundamental parameter - the lattice constant of the metal \dot{a} . As soon as the parameter \dot{a} stops changing, the spectrum of quantum states passes into a continuous spectrum.

The nanolayer $R(l)$ is a step function in E_n , which can be easily reduced to the Lebesgue integral, which plays an important role in quantum theory. Quantum threads (quantum planes) in the nanolayer $R(l)$ can be interpreted as solitons, crowdions, discrete breathers turning into nanocracks. Quantum threads in the $R(l)$ nanolayer and the nanolayer itself can be represented as a nanoparticle with a diameter of $R(l)$ and pre-melting occurs in it in a stepwise manner. It is finally shown that all metal monolayers differ significantly from each other.

Key words: nanolayer, mesolayer, nanostructure, metal, quantum structure, quantum thread, soliton, crowdion.

В.М. Юров^{1*}, В.И. Гончаренко², В.С. Олешко², К.Н. Жанғозин¹¹TSK Vostok ЖШС, Қарағанды қ., Астана қ., Қазақстан²Мәскеу авиациялық институты (Ұлттық зерттеу университеті), Мәскеу қ., Ресей*e-mail: exciton@list.ru

Металдардың беттік қабатының кванттық құрылымы

Бұл жұмыс металдардың беткі қабатының қалыңдығын және осы қабаттың кванттық құрылымын анықтау моделін ұсынады. Атомдық тегіс металл диаграмма түрінде берілген: наноқабат → мезоқабат → көлемді фаза, бір - бірінен өлшемдік әсер ету сипаты бойынша ерекшеленеді. Жаппай фазада өлшем әсері болмайды. Металдардың беткі қабатының қалыңдығы $R(l)$ цезийден басқа 1 нм - ден 10 нм-ге дейінгі өлшемге ие, яғни олар наноқұрылымды білдіреді. Наноқабаттың E_n энергетикалық деңгейлері бір іргелі λ параметрмен – металдың кристалдық тор константасымен анықталатыны көрсетілген. λ параметрінің өзгеруі тоқтаған бойда кванттық күйлер спектрі үздіксіз спектрге айналады. $R(l)$ наноқабатты E_n -ге қатысты кадамдық функция болып табылады, оны кванттық теорияда маңызды рөл атқаратын Лебег интегралына оңай келтіруге болады. $R(l)$ наноқабаттағы кванттық жіптерді (кванттық жазықтықтар) нанокректарға айналатын солитондар, краудиондар, дискретті тыныс алулар ретінде түсіндіруге болады. $R(l)$ наноқабаттағы кванттық жіптер мен наноқабаттың өзі диаметрі $R(l)$ нанобөлшек ретінде ұсынылуы мүмкін және онда алдын ала балқыту кезеңді түрде жүреді. Соңында, барлық металл моноқабаттары бір-бірінен айтарлықтай ерекшеленетіні көрсетілген.

Түйін сөздер: наноқабат, мезоқабат, наноқұрылым, металл, кванттық құрылым, кванттық жіп, солитон, краудион.

Введение

Все тела, находящиеся в пространстве, имеют поверхность. По Гиббсу Дж. В. [1] поверхность не имеет толщины и рассматривается как геометрический объект. Согласно подходам Ван-дер-Вальса [2], Гуггенгейма [3] и Русанова [4] поверхностный слой рассматривается как слой конечной толщины. Согласно современным представлениям [5, 6] под поверхностной фазой γ_1 понимают сверхтонкую пленку (поверхностный слой), находящуюся в равновесном состоянии с кристаллической основой (подложкой), свойства и структура которой отличны от объемных свойств γ_2 твердого тела. Экспериментально измерить толщину поверхностного слоя твердых тел научились в 70-80-х годах XX века, например, методом рентгеновской дифракции под скользящими углами (РДСУ) [7]. Принципиальная схема метода РДСУ показана на рис. 1а.

Пучок X-лучей 2 из источника 1 попадает на образец 3 под углом α , равного от долей до одного градуса, Дифрагированный пучок под углом 2θ попадает на детектор 4. Несмотря на простоту схемы метода РДСУ, провести измерение толщины поверхностного слоя чистых металлов $R(l)$ довольно сложно и под силу не каждой лаборатории и в не каждой стране и вот почему. Для германия $R(l) = 3,1$ нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), а для золота – $R(l) = 1,2$ нм. Чтобы измерить $R(l)$ нужно довольно мощный источник X-лучей, в качестве

которого в методе РДСУ используют синхротронное излучение (СИ), испускаемое релятивистскими заряженными частицами при повороте в магнитном поле (рис. 1 б) [8].

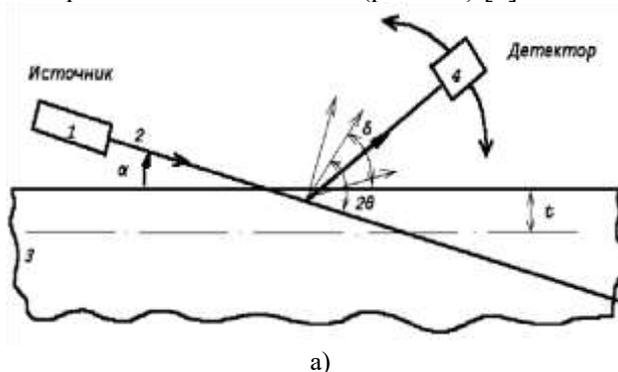


Рисунок 1 – Схема метода РДСУ (а) бустерный синхротрон (б)

Страны, где есть такие источники СИ – это США, Россия, Япония, Англия, Франция, Швейцария, Австралия. На следующем этапе, дело касается образца для измерения R(I). Для образца нужна атомно-гладкая поверхность (АГП) (рис. 2 а) [9]. АГП, иначе их называют сверхгладкие поверхности с высотой шероховатости менее 1 нм (рис. 2 б), являются одним из основных компонентов элементной базы современных нанотехнологий.

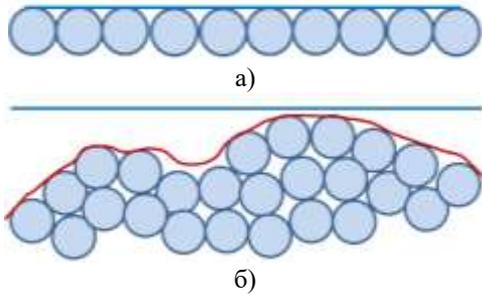


Рисунок 2 – Атомно-гладкая поверхность (а); шероховатая поверхность (ШП) (б)

Различие между АГП и ШП дается критерием Джексона [10] – $\alpha = \Delta H/kT$, где ΔH – энтальпия, k – постоянная Больцмана, T – температура. Считается, что критерий $\alpha > 4$ свидетельствует об АГП, $\alpha < 2$ – об ШП, значения же $2 \leq \alpha \leq 4$ соответствуют промежуточному типу поверхности. В таблице 1 обозначены: $\alpha > 4$ – жирным шрифтом; $\alpha < 2$ – подчеркиванием. Из 54 металлов к ШП относятся 11 металлов; к АГП – 30 металлов; к промежуточному типу – 13 металлов. Большинство сталей относятся к АГП.

По мнению многих авторов [5, 6, 9, 11] под поверхностью понимают несколько атомных

монослоев твердого тела толщиной ~ 1 нм, которые расположены на границе раздела твердого тела с вакуумом, газом, жидкостью, другим твердым телом (рис. 3 а).

В работе [12] вводится понятие естественного поверхностного слоя металла, который по механическим, физическим, а иногда и химическим свойствам, отличается от основного объема металла (рис. 3 б). В этом слое возникают большие напряжения за счет следующих технологических операций: термическая обработка (например, закалка, отпуск, отжиг); химическая обработка (например, карбонизация, азотирование); электрохимическая обработка (например, электролитическое покрытие); физическая обработка (например, имплантация ионов).

Исследование таких поверхностных слоев, основной характеристикой которых является шероховатость поверхности, привело к созданию научного направления – инженерия поверхности [13]. Эта отрасль знаний уделяет повышенное внимание вопросам коррозии металла, трибологии, процессам износа материала и его разрушения. Назовем этот слой металла – технологическим слоем, толщина которого может иметь значения от долей до сотен микрона.

На рис. 3 представлены следующие обозначение: а) 1 – поверхность (1 нм, 1-3 атомных слоя); 2 – ультратонкая пленка (от 1 до 10 нм, 3-30 атомных слоев); 3 – тонкая пленка (от 10 нм до 1 мкм, 30-300 атомных слоев); 4 – объем; б) 1 - 1 - адсорбированный слой; 2 - оксидный слой (1-10 микрон); 3 - переходный уровень (10-30 нм); 4 - технологический слой (несколько мм); 5 – объем металла.

Таблица 1 – Критерий Джексона для 54 металлов (М)

М	α	М	α	М	α	М	α	М	α
Li	<u>1.2</u>	In	<u>1.3</u>	Cd	2.5	Pr	2.5	Ac	4.2
Na	<u>1.1</u>	Tl	<u>1.7</u>	Hg	<u>0.9</u>	Nd	2.9	Th	6.5
K	<u>0.9</u>	Si	20.4	Cr	8.5	Sm	3.6	U	5.1
Rb	<u>0.9</u>	Ge	14.8	Mo	11.3	Eu	3.7	Np	3.9
Cs	<u>0.8</u>	Sn	2.9	W	331.7	Gd	4.0	Pu	<u>1.1</u>
Be	4.9	Pb	<u>1.9</u>	Mn	5.4	Tb	4.1	Am	4.0
Mg	3.7	Se	2.1	Tc	9.6	Dy	4.5	Bk	-
Ca	3.7	Te	7.2	Re	13.7	Ho	6.8	-	-
Sr	3.7	Cu	5.2	Fe	5.6	Er	8.0	-	-
Ba	3.1	Ag	4.8	Co	6.2	Tm	6.8	-	-
Al	4.3	Au	5.1	Ni	7.1	Yb	<u>1.3</u>	-	-
Ga	2.3	Zn	2.9	Ce	2.1	Lu	8.9	-	-

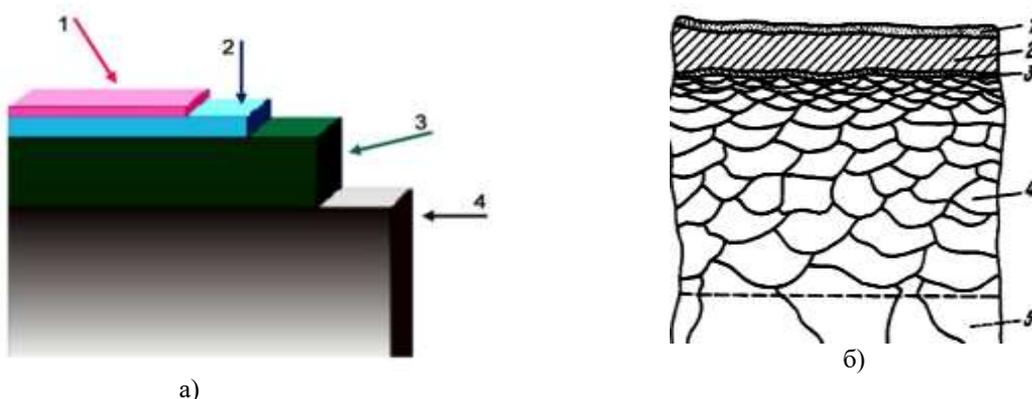


Рисунок 3 – Поверхность, тонкая пленка, покрытие, объем твердого тела [11] (а); естественный поверхностный слой металла [12] (б)

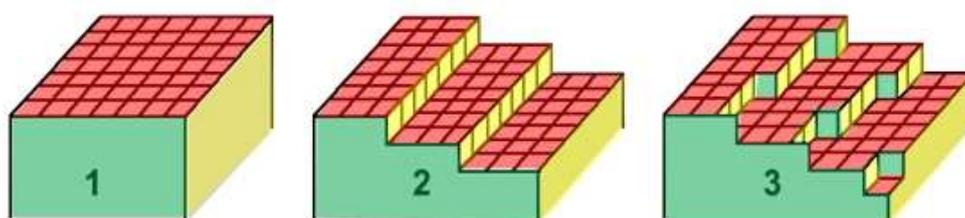


Рисунок 4 – Три типа поверхностей: сингулярные (атомно-гладкие) - 1, вицинальные (ступенчатые) - 2, несингулярные (диффузные) поверхности - 3

Существует несколько методов получения АГП [14]: 1 - химико-механическое полирование; 2 - отжиг в вакууме; 3 - эпитаксиальные методы; 4 - термическое выглаживание; 5 – раскалывание кристаллов в сверх высоком вакууме.

При раскалывании монокристаллов в вакууме по плоскости спайности могут образовываться три типа поверхностей: сингулярные (атомно-гладкие), вицинальные (ступенчатые), несингулярные (диффузные) поверхности (рис. 4) [5, 6].

На сингулярных поверхностях переход от твердой фазы к парообразной фазе осуществляется в пределах одного слоя, на вицинальных – переход осуществляется через несколько плоскостей, отделенных моноатомными ступеньками, а на диффузионных – переход от твердого тела к парообразной фазе осуществляется на протяжении нескольких атомных слоев. Однако толщина слоя неизвестна.

Мы будем рассматривать поверхностный слой как атомно-гладкую поверхность. Модель этого слоя предложена в работах [15, 16] (смотри, ниже).

Цель исследования

В настоящей работе предлагается модель определения толщины поверхностного слоя металлов и квантовая структура этого слоя.

Модель поверхностного слоя металлов

За основу модели мы возьмем наши работы [15, 16], где для толщины поверхностно слоя $R(I)$ твердого тела предложена уравнение:

$$R(I) = \beta \cdot 0.17 \cdot 10^{-9} \vartheta(i), \quad (1)$$

где β – коэффициент $\beta = 1$ (кг/м³) ат.%·м.

Уравнение (1) показывает, что толщина поверхностного слоя атомно-гладкого кристалла (без учета шероховатости поверхности) $R(I)$ определяется одним фундаментальным параметром – атомным объемом элемента ($v = M/\rho$, M – молярная масса, ρ – плотность элемента), который периодически изменяется в соответствие с таблицей Д.И. Менделеева. Схематически эта модель показана на рис. 5 а.

Толщина поверхностного слоя некоторых металлов показана в таблице 2.

В табл. 2 жирным выделены металлы с АГП, согласно таблицы 1. В скобках табл. 2 выделены количества монослоев металла – $n = R(I)/a$ (a – постоянная кристаллической решетки). Из табл. 2 и рис. 5 б следует, что АГП наблюдается в металлах с $1 < n < 6$, а ШП имеет место при $n > 6$. На рис. 5 б показано, что самый нижний ряд занимает углерод, у которого $n = 1$ (для алмаза) и $n = 3$ (для графита), вычисленные по уравнению 1.

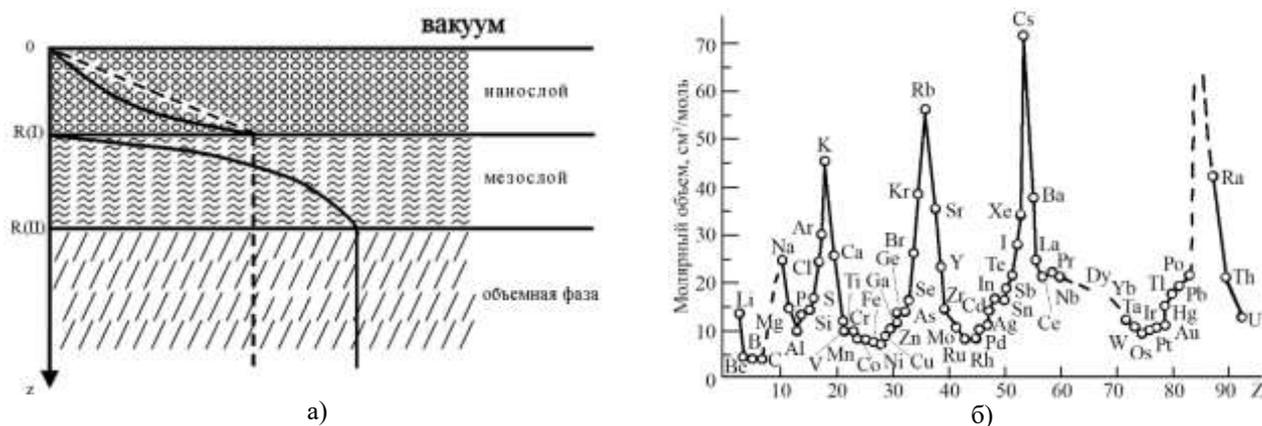


Рисунок 5 – Схема металла: нанослой → мезослой → объемная фаза (а); периодическое изменение атомного объема элементов (б)

Таблица 2 – Толщина поверхностного слоя чистых металлов (М)

M	R(I), nm								
Li	2.2 (6)	Sr	5.9 (10)	Sn	2.8 (5)	Cd	3.4 (11)	Fe	1.2 (4)
Na	4.5 (11)	Ba	6.6 (13)	Pb	3.1(6)	Hg	1.8 (5)	Co	1.1 (4)
K	7.7 (15)	Al	1.6 (4)	Ce	2.8 (5)	Cr	1.2 (4)	Ni	1.1 (3)
Rb	10 (18)	Ga	2.0 (4)	Te	3.5 (8)	Mo	1.8 (5)	Ce	3.6 (7)
Cs	12 (20)	In	2.7 (8)	Cu	1.2 (3)	W	1.6 (5)	Pr	3.5 (10)
Be	0.8 (3)	Tl	2.9 (8)	Ag	1.7 (4)	Mn	1.1 (2)	Nd	3.4 (9)
Mg	2.4 (7)	Si	2.0 (4)	Au	1.7 (4)	Tc	1.4 (5)	Sm	3.4 (9)
Ca	4.4 (8)	Ge	2.4 ((4)	Zn	1.6 (6)	Re	1.5 (5)	Eu	5.0 (11)

Из табл. 2 следует, что толщина поверхностного слоя металлов R(I) имеет размер от 1 нм до 10 нм, кроме цезия, т.е. представляют собой наноструктуру (рис. 5 а). Если обратиться к рис. 3 а, то слой R(I) = поверхность + ультратонкая пленка. Размерные эффекты в слое R(I) определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие размерные эффекты наблюдаются только в наночастицах и наноструктурах [17]. В наноструктурном слое R(I) с атомами чистых металлов происходит реконструкция или релаксация, связанная с перестройкой поверхности (рис. 6) [5].

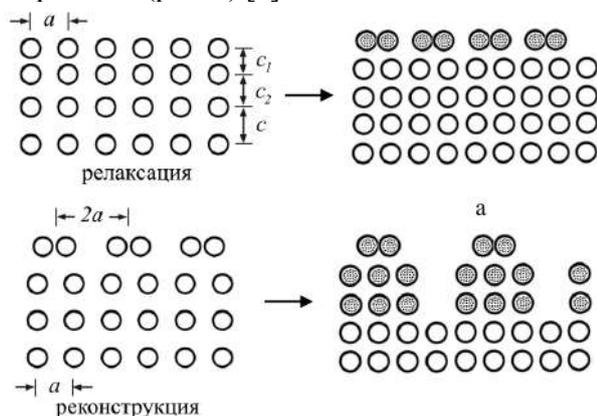


Рисунок 6 – Преобразование поверхности металла

На релаксированной поверхности наблюдается изменение межплоскостных расстояний c , а на реконструированной же поверхности может изменяться расположение приповерхностных атомов a (рис. 6). Для поверхностей ГЦК металлов (таких, как Al, Au, Ni) характерны процессы релаксации, а ОЦК металлов (Fe, W, Mo) – процессы реконструкции. Слой R(I) является неупорядоченной наноструктурой, где возникают значительные внутренние напряжения, приводящие к возникновению дислокаций и нанотрещин [18]. Поверхностный слой R(I) представляет собой синергетическую систему, фундаментальные свойства которой подвержены саморегулированию и самоорганизации.

При $h = R(I)$ происходит фазовый переход II рода (по Эренфесту), где происходит скачок теплоемкости (рис. 5 а). Этот эффект рассмотрен нами в работе [19].

Слой R(II), который назовем мезоструктурой (рис. 5 а), простирается примерно до размера $h \approx 9 R(I)$, где начинается объемная фаза. С этого размера ($< 9 R(I)$) начинаются размерные эффекты другого типа. Отличие мезоструктур от наноструктур и объемной фазы заключается в том, что только в этих системах наблюдаются

фликкер-шумы со спектром типа $1/f^b$ [20]. Слой R(II) относится к наноматериалам. Под наноматериалами принято понимать материалы, основные структурные элементы которых не превышают нанотехнологической границы ~ 100 нм, по крайней мере, в одном направлении [21]. Ряд исследователей высказывает мнение, что верхний предел (максимальный размер элементов) для наноструктур должен быть связан с неким критическим характерным параметром: длиной свободного пробега носителей в явлениях

переноса, размерами доменов/доменных стенок, диаметром петли Франка-Рида для скольжения дислокаций и т.п. [22]. Значит в слое R(II) должно быть много размерных эффектов, связанных с температурой (рис. 7 а), магнетизмом (рис. 7 б), оптикой (рис. 7 с) и другими свойствами.

Таким образом, металл представляет собой структуру: нанослой \rightarrow мезослой \rightarrow объемная фаза, которые отличаются между собой зависимостью всех физических свойств.

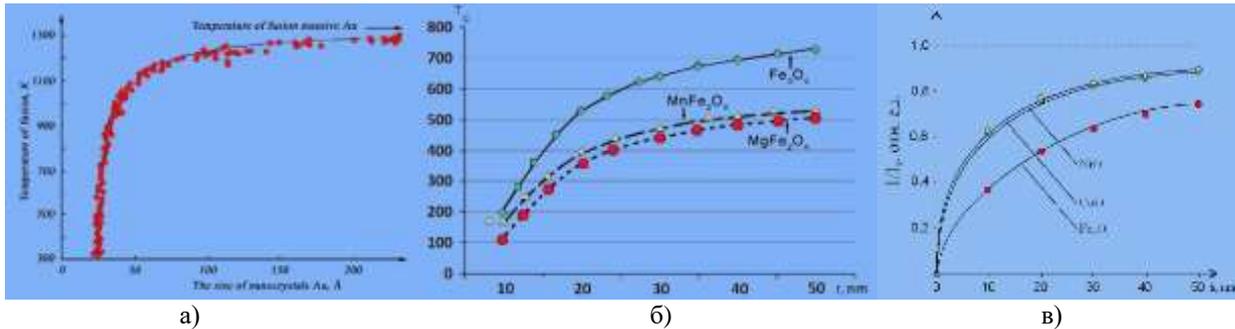


Рисунок 7 – Размерная зависимость температуры Au (а) [23], температуры Кюри T_c [24] (б), люминесценции оксидов [25] (в)

Квантовая структура нанослоя металла

Сначала мы обратимся к работе [26], где приводится краткий обзор результатов исследований квантово-размерных эффектов в тонких пленках металлов (Au, Ag) на поверхности тугоплавких металлов (W(110), Mo(110)) и *d*-металлов (Ni(111)), начиная с субмонослойных покрытий и до толщин порядка десяти монослоев, полученных методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением.

Из рис. 8 следует, что квантовые состояния серебра изменяются ступенчатым способом для основных ветвей. В монослое (1ML) в спектре ФЭ наблюдается одно квантовое *sp*-состояние при энергии $\sim 4,2$ эВ. Остальные квантовые состояния обусловлены *d*-состояниями. Для объяснения спектров ФЭ в работе [26] используется расширенная фазовая модель, графическое решение которой дает удовлетворительное согласие с экспериментом. Там же показано, что при толщинах $\sim 15ML$ спектр ФЭ переходит в непрерывный спектр.

В более поздней работе [27] также получены аналогичные [26] результаты. Однако, здесь рассматривается движение частицы в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими «стенками», изложенному во всех учебниках по квантовой механике. Уровни энергии E_n в такой яме равны:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m_e L^2}, \quad (2)$$

где n – число квантовых состояний одномерной ямы (пленки); L – толщина этой пленки. Если учесть, что $L = R(I)$, а $n = R(I)/\delta$ (δ – постоянная кристаллической решетки), то формула (2) будет выглядеть так:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m_e \delta^2}, \quad (3)$$

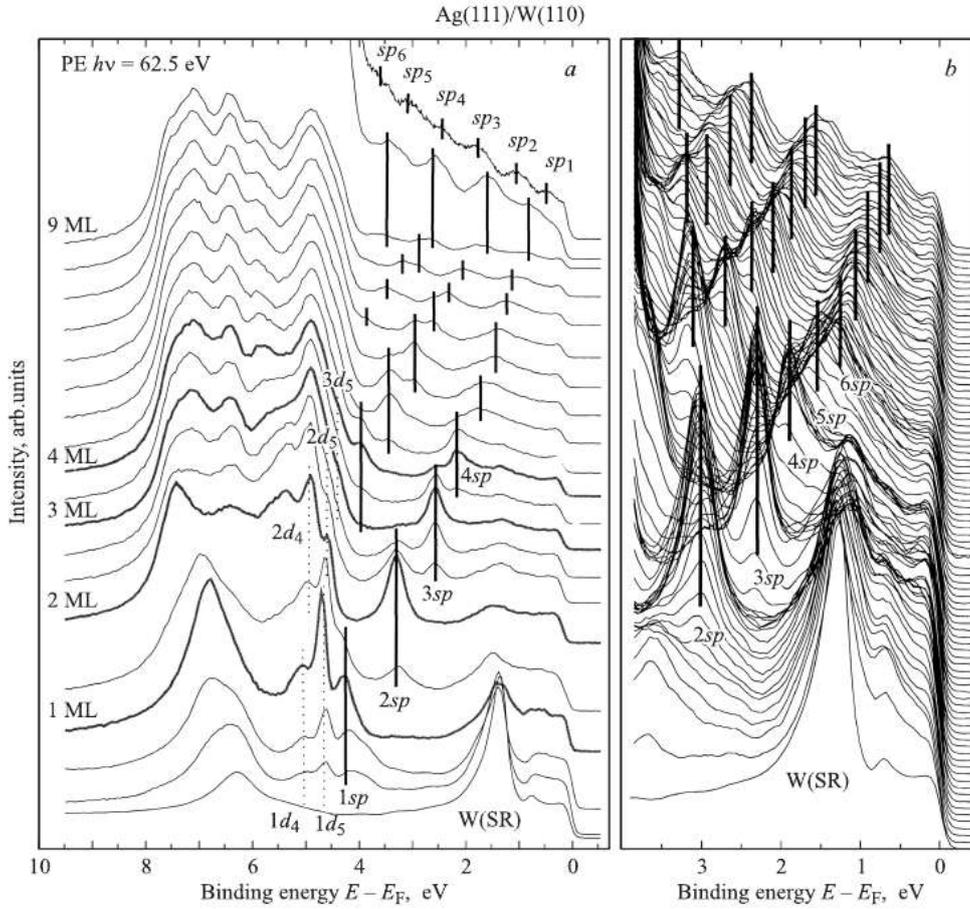
где $n = 1, 2, 3, \dots$. Если учесть, что нами получена формула [15, 16]:

$$A(r) = A_0 \left(1 - \frac{R(I)}{r} \right), R(I) < r < R(II), \quad (4)$$

$$A(r) = A_0 \left(1 - \frac{R(I)}{R(I) + r} \right), 0 < r < R(I),$$

где $A(r)$ – физическое свойство нано- и мезослоя; A_0 – физическое свойство объема; $r = z$ (рис. 5 а). Если принять $A(r) = E_n$ – уровню энергии, то при $1 - R(I)/R(I) + r \approx \exp[-(R(I)/R(I) + r)]$ будет в нанослое $E_n(r) = E_n/\exp[-(R(I)/R(I) + r)]$. После этого уровень E_n , то есть при $r = 0$ и при $r = R(I)$ будет равно: $E_n(r = 0) = E_n/e$; $E_n[r = R(I)] = E_n/e^{0.5}$. Уровень E_n уменьшается на поверхности металла в 2,72 раза, а на границе слоя R(I) – в 1,65 раза. Все это показано на рис. 9 а. В мезослое уровень

E_n будет зависеть по формуле 1 в уравнении (4), $= E_n(1/e^{0.9}) \approx E_n$ и уровень энергии будет выглядеть при этом $1-R(I) \approx \exp(-R(I)/r)$. Тогда $E_n[R(I)/9R(I)]$ так, как на рис. 9 б.



На части *a* выборочно показано от одного до трех спектров на формируемый монослой в полном диапазоне существования *sp*-ид-состояний. На части *b* представлены непрерывные изменения спектров в диапазоне *sp*-состояний, показывающие дискретность формирования пиков квантовых состояний [26].

Рисунок 8 – Серии фотоэлектронных (ФЭ) спектров, измеренных по нормали к поверхности в процессе напыления пленок Ag(111) на поверхность W(110), показывающие формирование соответствующих спектров квантовых состояний как *sp*-, так и *d*-характера при изменении толщины напыляемой пленки

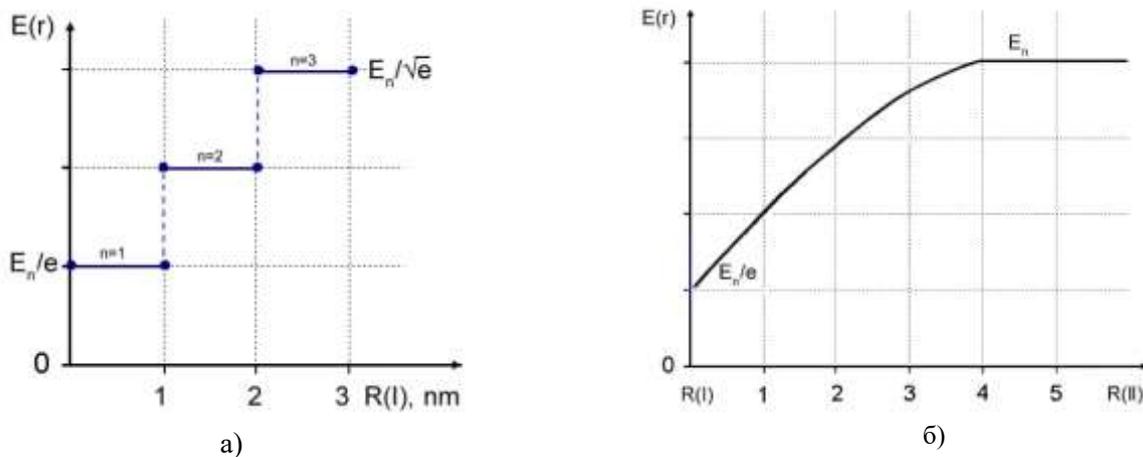


Рисунок 9 – Зависимость уровня энергии E_n , которое пропорционально числу Лоренца [28], в нанослое (а) и в мезослое (б).

Из формул (3) и (4), а также из рис. 9 следует квантовая структура поверхностного нанослоя, которая может быть представлена уровнями Ландау (рис. 10).

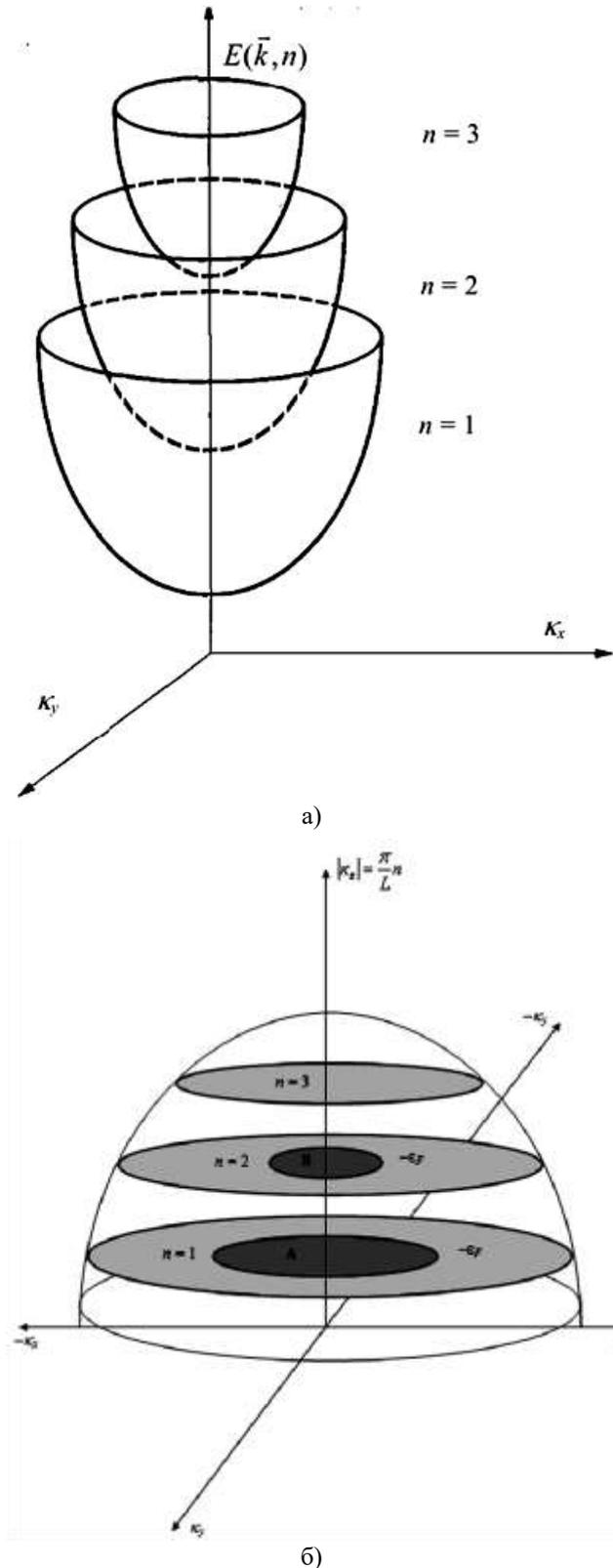


Рисунок 10 – Квазидискретный спектр электронов в квантовой яме (а); распределение электронных состояний в импульсном пространстве (б) [27]

Из уравнения (3) следует, что уровни энергии E_n нанослоя определяются одним фундаментальным параметром – постоянной кристаллической решетки металла \dot{a} :

$$E_n = 10^{-37} \frac{n^2}{\dot{a}}. \quad (5)$$

Постоянная кристаллической решетки \dot{a} изменяется в слое R(I) из-за реконструкции или релаксации поверхности металла (рис. 6). Это значит, что монослой металла можно представлять как квантовые нити (или квантовые плоскости) с энергией E_n . Как только параметр \dot{a} перестает изменяться, спектр квантовых состояний переходит в непрерывный спектр, где для металла выполняются классические законы Друде–Лоренца [29].

Нанослой R(I) представляет собой по E_n (и всех $A(r)$ из уравнения (4)) ступенчатую функцию (рис. 9), которую нетрудно привести к интегралу Лебега [30], играющему важную роль в квантовой теории [31]. В частности, квантовые нити в нанослое R(I) можно трактовать как солитоны (рис. 11) [32].

На рис. 11 (вверху) а) представлено развитие поля во времени. Набор линий изображает конфигурации поля в последовательные промежутки времени. На рис. 11 (вверху) б) изображено распределение энергии, соответствующее данной конфигурации поля. В начальный момент времени солитон и антисолитон движутся навстречу друг другу, причем антисолитон движется быстрее и, следовательно, имеет большую энергию. Столкновение двух волн приводит к их аннигиляции, а энергия их немедленно идет на рождение новой солитон-антисолитонной пары. Такое одномерное поле называется полем синус-Гордона. Всюду вне области, занятой солитоном и антисолитоном, поле принимает значение, соответствующее нулевой энергии.

На рис. 11 (внизу) показано, что из-за дисперсии амплитуда обычной волны при движении уменьшается и расплывается, и в конце концов волна полностью исчезает. Солитон (б) — это волна, которая не диссипирует, поскольку дисперсия подавлена другими эффектами волнового движения. Солитон представляет собой сгусток энергии, который может двигаться от точки к точке, но не может распределиться по всему пространству.

Более подробно о солитоне можно ознакомиться в монографии [33].

В работе [34] на основе модифицированного одномерного уравнения Шредингера произведена

оценка энергии связи солитона от его размера b вблизи поверхности металла. Было получено, что $E_n \sim 1/b^2$ и при $a = b$ совпадает с уравнением (5). Отсюда следует, что нанослой R(I) металла представляет собой нелинейную наноструктуру, которой присуща анизотропия.

В работе [18] нами показано, что нанослой R(I) металла подвержен значительным внутренним напряжениям, которые вызывают большое число дефектов и нанотрещин. Эти дефекты могут в металле превращаться (помимо солитона) в краудион, даже при комнатной

температуре [35]. Краудионы, которые относятся к топологическим солитонам, в металлах являются очень подвижными, иногда сверхзвуковыми (обеспечивая массоперенос) по сравнению с другими точечными дефектами. Теоретически методом молекулярной динамики показано на ГЦК металле (медь и никель), что при их сильной деформации краудионная конфигурация типа (110) собственного междоузельного атома оказывается стабильной в широком диапазоне температур [35].

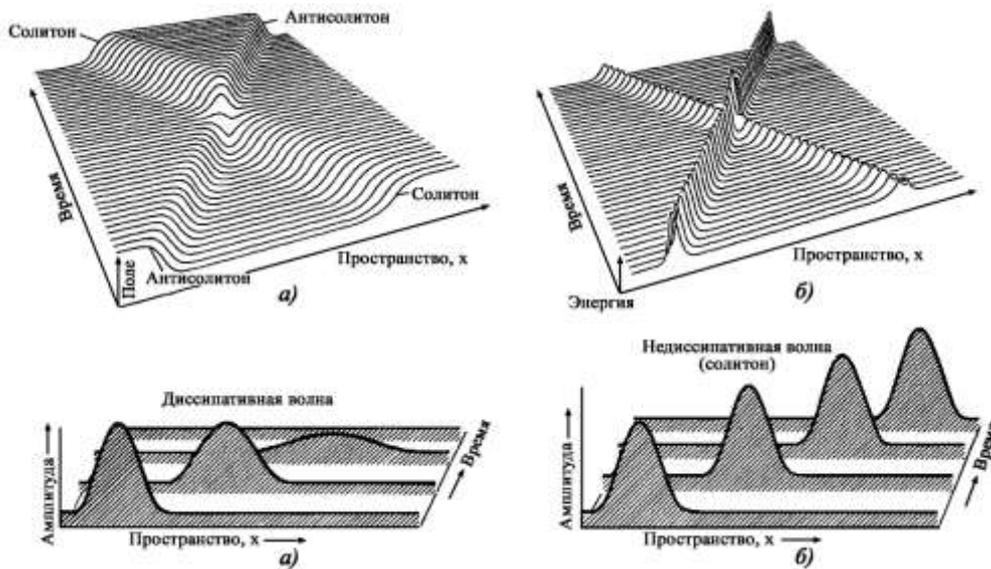


Рисунок 11 – Солитон и антисолитон похожи на направленные в противоположные стороны складки в структуре поля; неизменность волны ограничена главным образом дисперсией, процессом, благодаря которому гармоники, имеющие различные длины волн, распространяются с различными скоростями [32]

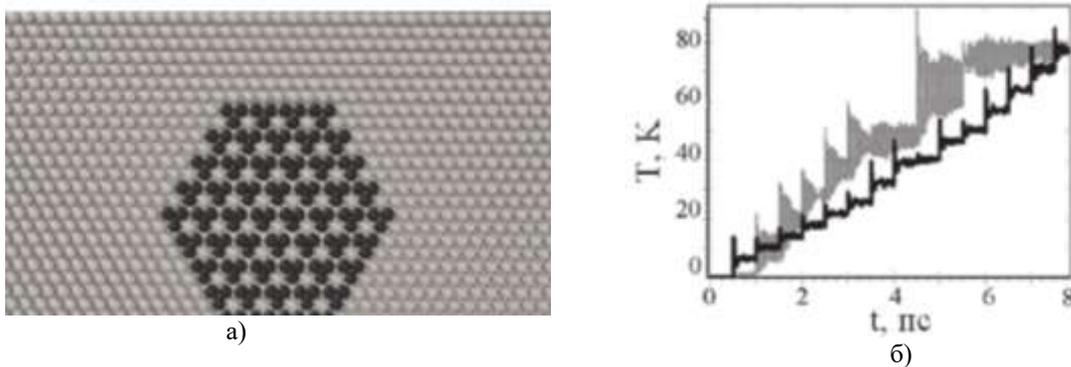


Рисунок 12 – Локализация колебаний атомов дискретного бривера в плоскости [111] в ГЦК меди (а); локализация энергии дискретного бривера температурные кривые подрешеток Pt (черный цвет) и Al (серый цвет) при взаимодействии кристаллической решетки сплава Pt_3Al с частицами с энергией 1 эВ (б) [37, 38]

Обратимся теперь к корпускулярно-волновому дуализму. Квантовые нити в нанослое R(I) и сам нанослой можно представить как наночастицу диаметром $R(I)$. Соответствие поверхностного слоя твердого тела его наночастице было предложено А.И. Русановым в

работе [39]. По его мнению, если размер наночастицы соизмерим с толщиной поверхностного слоя, то такая наночастица не может содержать внутри себя объемную фазу. Уточним подход А.И. Русанова в следующей редакции: если размер наночастицы соизмерим с толщиной

монослоя твердого тела, то такая наночастица не может содержать внутри себя объемную фазу. Приведем пример: алмаз содержит в слое R(I) один монослой углерода по уравнению (1); графен представляет один слой графита. Значит, все они представляют собой наночастицы без объемной фазы, поэтому о плавлении и предплавлении у алмаза и графена не может быть и речи без экстремальных условий (в частности,

высоких давлений и высоких температур). Размер такой наночастицы будет равен постоянной кристаллической решетки.

Если же размер наночастицы больше толщины поверхностного слоя, то внутри наночастицы присутствует сеть квантовых нитей (квантовых плоскостей) и речь может идти о плавлении и предплавлении кристалла (рис. 13) [40].

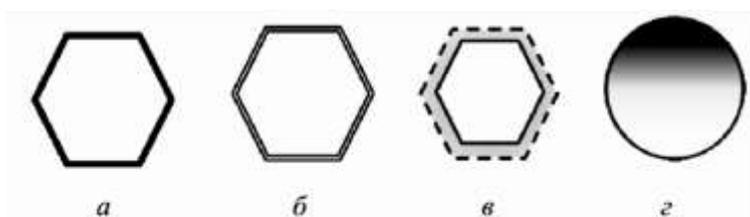


Рисунок 13 – Плавление наночастицы: а – исходная наночастица; б – наночастица при температуре плавления поверхностного слоя T_{sm} (слой R(I)); в – наночастица при промежуточной температуре (слой R(II)) $T_{sm} < T < T_m$; г – расплавленная наночастица при температуре плавления T_m [40]

Плавление твердых тел обычно начинается с образования тонкого слоя «квазижидкости» на поверхности при температуре ниже точки их объемного плавления. Этот эффект называют также поверхностным плавлением или предплавлением (premelting). Предплавление твердых тел остается пока вопросом дискуссионным, поскольку разные авторы придерживаются противоположных суждений [41]. Это связано еще с тем, что до наших работ [18, 19] не научились еще четко определять толщину поверхностного слоя твердых тел. Предплавление было замечено в начале 19 века Фарадеем на кристаллах льда. Рис. 14 а показывает, что предплавление в нанослое R(I) происходит ступенчатым способом, а в мезослое оно выглядит так (рис. 14 б).

В мезослое R(II) структура несколько иная, чем в нанослое R(I) и объемной фазе, из-за различия в размерных эффектах (рис. 9 б). Это наглядно продемонстрировано в работе [42], где экспериментально исследованы зависимость удельного сопротивления и коэффициента отражения от толщины пленок металлов.

На рис. 15 методом вакуумного осаждения на полимерной подложке выращены аморфные пленки серебра, меди, золота и железа толщиной 6-60 нм, т.е. толщиной больше R(I), но в пределах слоя R(II), поэтому ступенчатая структура этих зависимостей не наблюдается, как это видно из рис. 8. Физика мезоструктур [43, 44] отлична от физики нанослоя, где проявляются квантовые эффекты. О ней мы будем говорить позже. Как теперь влияют монослои твердого тела на свойства объемной фазы? Этот вопрос остается пока

неисследованным. Рассмотрим, в качестве примера, графит (рис. 16 а).

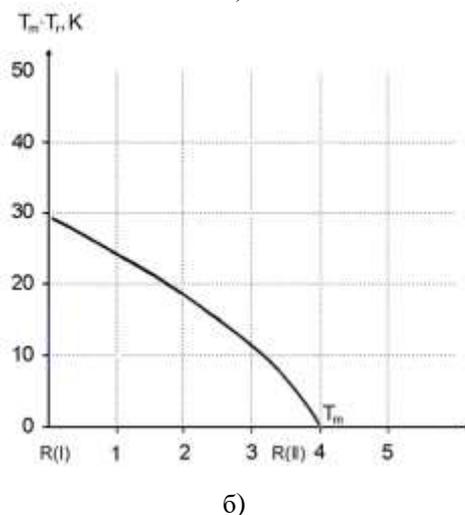
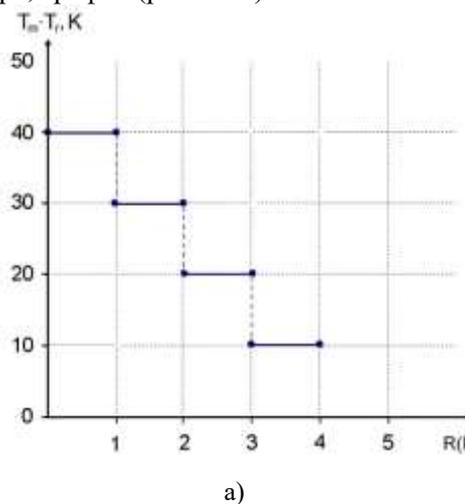
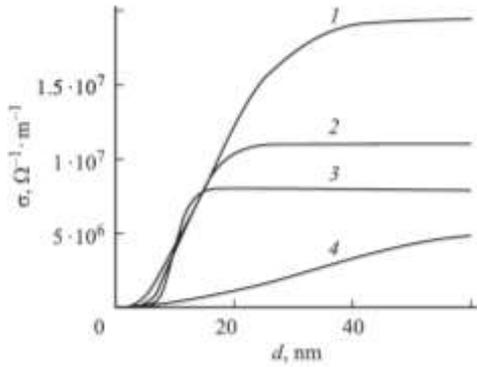
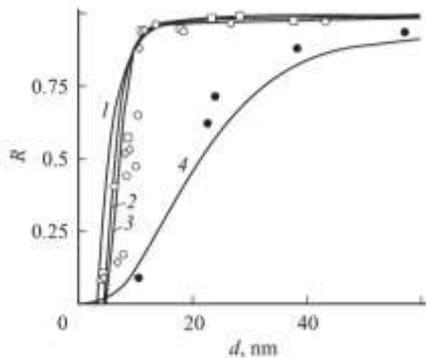


Рисунок 14 – Предплавление металлов: в нанослое R(I) (а); мезослое R(II) (б)

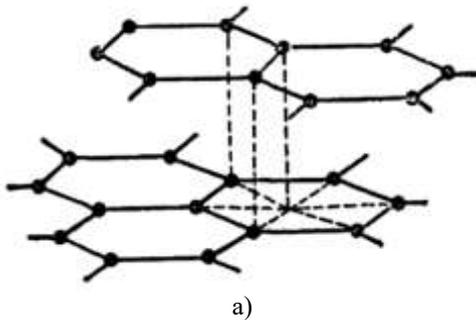


а)

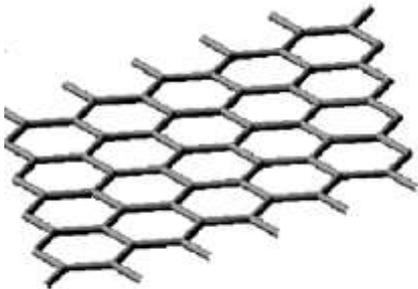


б)

Рисунок 15 – Зависимость удельной проводимости от толщины пленок различных металлов: 1 – серебро; 2 – медь; 3 – золото; 4 – железо (а); теоретические (сплошные кривые) и экспериментальные (значки) зависимости коэффициента отражения от толщины пленки: 1, светлые кружки – серебро; 2, светлые квадратики – медь; 3, светлые ромбики – золото; 4, темные кружки – железо.

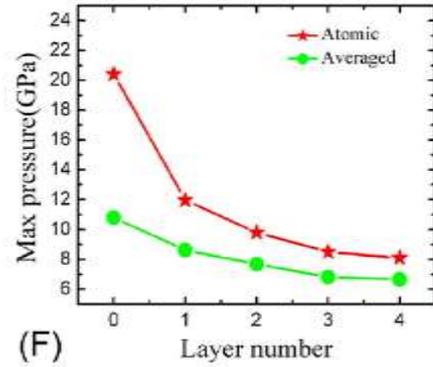


а)

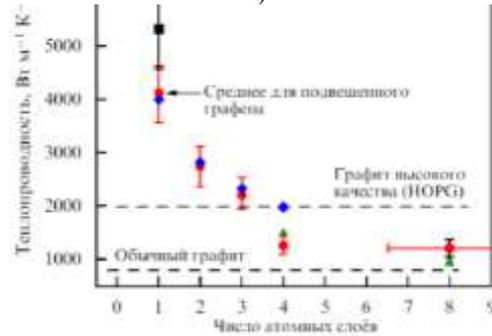


б)

Рисунок 16 – Кристаллическая структура графита (а) и графена (б)



а)



б)

Рисунок 17 – Изменение максимального атомного напряжения (красная линия) и максимального среднего давления (зеленая линия) в зависимости от количества слоев графена (а) [49]; зависимость коэффициента теплопроводности пленок, составленных из нескольких графеновых слоев, от их числа (б) [50]

Графит является аллотропной модификацией углерода с атомной массой 12,0107 г/моль, плотностью 2,26 г/см³ и sp²-гибридизацией атомов углерода [45]. Он относится к слоистым кристаллам. Если отщепить у графита один монослой, то получается графен (рис. 16 б), обладающим уникальными свойствами [46]. Если использовать формулу (1), то для графита получаем, что поверхностный слой составляет R(I)_a = 0,9 (3) нм и R(I)_c = 2,46 (3) нм [47, 48]. Итак, графит обладает 3 монослоями, которые подтверждены экспериментально в работах [49, 50] (рис. 17).

Оба рисунка наглядно показывают, что слой R(I) для графита содержит 3 слоя, что говорит о справедливости предложенной нами модели (1). Больше трех слоев графен превращается в графит и значения величин на рис. 17 перестают зависеть от числа слоев.

Первый монослой графита – графен, имеет прочные ковалентные σ-связи С-С в плоскости графенового листа в сочетании с π-электронами вне его определяет уникальные физико-химические свойства графена, такие как большая теоретическая удельная поверхность (~ 2600 м²/г), высокая подвижность носителей заряда (~

200000 см²/В·с), высокий модуль Юнга (~ 1000 ГПа), тепловая проводимость (~ 5000 Вт/м К), оптическая прозрачность (~ 97.7%), механическая прочность и т. д. [45-50].

Двухслойный графен отличается от однослойного графена и графита. Он активно исследуется [51] в связи с управляемой шириной запрещенной зоны. Аналогом двухслойного графена является графен Стоуна-Уэльса или SW-графен, по структуре более стабильный, чем графен [52].

Трехслойный графен отличается от двух последних подвижностью и проводимостью [53]. Особенность трехслойного графена состоит в том, что после его кручения под магическим углом у него возникает сверхпроводимость, которая выдерживает магнитные поля в 2-3 раза превышающие предел Паули для спин-синглетного спаривания [54].

Таким образом, все монослои в нанослое твердого тела существенно отличаются в соответствии с их энергетическим положением, выраженного на рис. 9 а и следующих уравнениям (1) – (5).

Заключение

Нанослой R(I) для большинства металлов не превышает 10 нм и представляет собой квантовую наноструктуру. Слой R(II) представляет собой мезоструктуру не превышающую для металлов размер в 100 нм, которая по Гайтлеру относится к наноструктурам. Отличие мезоструктур от нанослоя заключается в том, что у них наблюдаются другие размерные эффекты, но присутствует фазовая когерентность и разные мезоскопические эффекты, которым мы посвятим следующую статью.

Благодарности

Данная научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН № AP32488258 «Разработка инновационной технологии получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой и модификация графеном ВТСП керамики» (исследование финансируется МОН РК).

Литература

- 1 Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. – Москва: ГИТТЛ, 1950. – 303 с.
- 2 Van der Waals I.D. Thermodynamische Theorie der Capillarität. – Amsterdam: Verh. Kon. Acad., 1893. – 529p.
- 3 Guggenheim B.A. Thermodynamics. – Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1967. – 390 p.
- 4 Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. – Ленинград: Химия, 1967. – 388 с.
- 5 Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. – Москва: Наука, 2006. – 490 с.
- 6 Bracco G., Holst B. Surface Science Techniques. – Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2013. – 663 p.
- 7 Daillant J., Gibaud A. X-ray and Neutron Reflectivity. – Springer: Berlin Heidelberg, 2009. – 348 p.
- 8 Левичев Е.Б. ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН/ИЯФ СО РАН. – Школа по физике и технике ускорителей, ОИЯИ, Дубна, 3-8 июля 2023. – 28 с.
- 9 Щербакоева Е.Н. Физика поверхности. – Минск: БНТУ, 2023. – 151 с.
- 10 Jackson K.A. Interface kinetics, in Growth and Perfection of Crystals. – New York: John Wiley, 1958. – P.319-324.
- 11 Кузнецов М.В. Современные методы исследования поверхности твердых тел: фотоэлектронная спектроскопия и дифракция, СТМ-микроскопия. – Екатеринбург, 2010. – 43 с.
- 12 Starzynski G. and Gambin W. Natural surface layer of metals // Acta Physica Polonica. – 1996. – Vol. 89. No.3. – P. 377-381.
- 13 Dearnley P.A. Introduction to Surface Engineering. – Cambridge University Press, 2017. – 314 p.
- 14 Characterization of amorphous and crystalline rough surface: principles and applications. Editors: Zhao Y., Wang G.-C, Lu T.-M. Academic Press, 2000. – Vol. 37. – 417 p.
- 15 Юров В.М. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019, вып. 11. – С.389-397.
- 16 Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S., Sha Mingun. Anisotropy of the surface of carbon materials // Eurasian Physical Technical Journal. – 2021. – Vol. 18, No. 3(37). – P.15-24.
- 17 Уваров Н.Ф., Болдырев В.В. Размерные эффекты в химии гетерогенных систем // Успехи химии. – 2001. – Т. 70 (4). – С.307–329.
- 18 Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. Исследование первичных нанотрещин атомарно-гладких металлов // Письма в ЖТФ. – 2023. – Т.49, вып. 8. – С. 35-38.
- 19 Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.Ch., Zavatskaya O.N. Structural phase transition in a surface layer of metals // Bulletin of the Karaganda Univ., “Physics Series”. – 2019. – Vol.1 (93). – P.50-60.
- 20 Машкина Е.С. Спектральный анализ тепловых флуктуаций в переходных областях предплавления КИ // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2020. – Т. 22(2). – С. 238-244.

- 21 Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta mater.* – 2000. – Vol.48. – P.1-29.
- 22 Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. - Москва: Физматлит, 2005. – 412 с.
- 23 Buffat P., Borel J.P. Size effect on the melting temperature of gold particles // *Phys. Rev. A.* – 1976. – Vol. 13. – P.2287–2294.
- 24 Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких магнитных наноструктур // *Нано- и микросистемная техника.* – 2019. – №6. – С.347-352.
- 25 Юров В.М. Размерные эффекты в люминесценции кристаллофосфоров // *Сборник статей Международной LXXIV научно–практической конференции (памяти А.Л. Чижевского).* – Москва: ЕФИР, 2020. – С.6-12.
- 26 Шикин А.М., Адамчук В.К. Квантово-размерные эффекты в тонких слоях металлов на поверхности монокристаллов и их анализ // *ФТТ.* – 2008. – Т. 50, №6. – С.1121-1137.
- 27 Кривчик В.Д. Квантовый размерный эффект и квантовое туннелирование с диссипацией как основа представлений современной нанoeлектроники. Часть I. Классические и квантовые размерные эффекты // *Инжиниринг и технологии.* – 2016. – Vol. 1(1). – С.1-18.
- 28 Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. Deviations from the Wiedman-Franz law // *Proc. of the Intern. Conf. «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration»*, April 26, 2024, Beijing, PRC. – P.203-209.
- 29 Ливанов Д.В. Физика металлов. – Москва: МИСиС, 2006. – 280 с.
- 30 Лазарева Е.Г., Емельянова Т.В. Теорема о замене переменной в интеграле Лебега. Избранные лекции. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2019. – 40 с
- 31 Frolov I., Schwarz A. Quantum mechanics and quantum field theory. Algebraic and geometric approaches // *arXiv: 2301.03804v1 [quant-ph]-10 Jan 2023.* – 100 p.
- 32 Ребби К. Солитоны // *УФН.* – 1980. – Т.130, вып. 2. – С.329-356.
- 33 Борисов А.Б., Киселев В.В. Двумерные и трехмерные топологические дефекты, солитоны и текстуры в магнетиках. – Москва: Физматлит, 2022. – 456 с.
- 34 Князем М.А., Русакевич Д.А. Оценка энергии связи солитона вблизи поверхности металла // 10-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение– 2017». Минск, БНТУ. – С.267-269.
- 35 Стариков С.А., Кузнецов А.Р., Сагарадзе В.В. Краудион в деформируемом ГЦК-металле. Атомистическое моделирование // *Физика металлов и металловедение.* – 2021. – Т. 122, № 12. – С.1296-1301.
- 36 Дмитриев С.В., Корзникова Е.А., Баимова Ю.А., Веларде М.Г. Дискретные бризеры в кристаллах // *УФН.* – 2016. – Том. 186, №5. – С.471-488.
- 37 Корзникова Е.А., Фомин С.Ю., Дмитриев С.В. Локализованные колебания в двумерных решетках: монография. – СПб.: Научное издание, 2018. – 130 с
- 38 Старостенков М.Д., Захаров П.В., Медведев Н.Н. Дискретные бризеры в ГЦК и ГЦТ-кристаллах // *Известия АлтГУ. Физика.* – 2019. – № 4 (108). – С. 49-60.
- 39 Русанов А.И. Удивительный мир наноструктур // *Журнал общей химии.* – 2002. – Т. 72, вып. 4. – С.532-549.
- 40 Борыняк Л.А., Чернышев А.П. Метод расчета эквивалентной температуры спекания нанопорошков // *Обработка металлов.* – 2013. – № 2 (59). – С.39-43.
- 41 Fan X., Chen X., Pan D., Liu Y., Liu P. and Li M. Localization and delocalization of surface disordering in surface mediated melting // *Phys. Rev. B.* – 2021. – Vol.104. – Art.No 134204.
- 42 Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В., Карпушов Е.Н. Проводящие и отражающие свойства тонких металлических пленок // *Журнал технической физики.* – 2004. – Том 74, вып. 11. – С.102-106.
- 43 Панин В.Е., Гриняев Ю.В. Физическая мезомеханика – новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела // *Физическая мезомеханика.* – 2003. – Т.6, № 4. – С.9-36.
- 44 Москалец М.В. Основы мезоскопической физики. – Харьков: НТУ – ХПИ, 2010. – 180 с.
- 45 Jäger H., Frohs W. (Eds.) *Industrial Carbon and Graphite Materials: Raw Materials, Production and Applications (Two Volume Set).* - Wiley-VCH, 2022. – 991 p.
- 46 Новоселов К.С. Графен: материалы Флатландии // *УФН.* – 2011. – Т. 181, № 12. – С. 1299-1311.
- 47 Yurov V.M., Zhangozin K.N. At the mechanism of graphite splitting bouby aqueous solutions // *Znanstvena misel journal.* – 2024, №86. – P.41-49.
- 48 Yurov V., Zhangozin K. About the mechanism of graphite splitting // *International independent scientific journal.* – 2024, №58. – P.29-40.
- 49 Xu Q., Li X., Zhang J., Hu Y., Wang H., Ma T. Suppressing nanoscale wear by graphene/graphene interfacial contact architecture: a molecular dynamics study // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2017. – Vol.9. – Art.No 40959.
- 50 Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // *УФН.* – 2011. – Т.181, №3. – С.233-268.
- 51 Rozhkov A.V., Sboychakov A.O., Rakhmanov A.L., Noria F. Electronic properties of graphene-based bilayer systems // *Physics Reports.* – 2016. – Vol. 648, №1. – P.1-104.
- 52 Подливаев А.И. Двухслойный графен - Стоун-Уэльсовский графен: структура, устойчивость и межслоевая теплопроводность // *Письма в ЖЭТФ.* – 2022. – Vol. 115, №6. – P.384-391.

53 Craciun M.F., Russo S., Yamamoto M., Oostinga J.B., Morpurgo A.F. and Tarucha S. Trilayer graphene is a semimetal with a gate-tunable band overlap // *Nature Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 4. – P.383-388.

54 Devakul T., Ledwith P.J., Xia L.-Q., Uri A., de la Barrera S., Jarillo-Herrero P., and Fu L. Magic-angle helical trilayer graphene // *Science Advances*. – 2023. – Vol.9 (36): eadi6063.

References

- 1 J.V. Gibbs, *Thermodynamicheskie raboty* (GITTL, Moscow, 1950), 303 p. (In Russ.)
- 2 I.D. Van der Waals, *Thermodynamische Theorie der Capillaritat* (Verh. Kon. Acad., Amsterdam, 1893), 529 p.
- 3 B.A. Guggenheim, *Thermodynamics* (North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1967), 390 p.
- 4 A.I. Rusanov, *Fazovyie ravenovesiya i poverkhnostnye yavleniya* (Khimiya, Leningrad, 1967), 388 p. (In Russ.)
- 5 K. Oura, V.G. Lifshits, A.A. Saranin, A.V. Zotov, M. Katayama, *Vvedenie v fiziku poverkhnosti* (Nauka, Moscow, 2006), 490 p. (In Russ.)
- 6 G. Bracco and B. Holst, *Surface Science Techniques* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013), 663 p.
- 7 J. Daillant and A. Gibaud, *X-ray and Neutron Reflectivity* (Springer, Berlin Heidelberg, 2009), 348 p.
- 8 E.B. Levichev, CKP “SKIF” IK SO RAN/IYaF SO RAN (Dubna, OIYaI, 2023), 28 p. (In Russ.)
- 9 E.N. Shcherbakova, *Fizika poverkhnosti* (BNTU, Minsk, 2023), 151 p. (In Russ.)
- 10 K.A. Jackson, in *Growth and Perfection of Crystals* (John Wiley, New York, 1958), pp. 319–324.
- 11 M.V. Kuznetsov, *Sovremennye metody issledovaniya poverkhnosti tverdykh tel: fotoelektronnaya spektroskopiya i difraktsiya, STM-mikroskopiya* (Yekaterinburg, 2010), 43 p. (In Russ.)
- 12 G. Starzynski and W. Gambin, *Acta Phys. Pol.* 89, 377 (1996).
- 13 P.A. Dearnley, *Introduction to Surface Engineering* (Cambridge University Press, Cambridge, 2017), 314 p.
- 14 Y. Zhao, G.-C. Wang, and T.-M. Lu, *Characterization of Amorphous and Crystalline Rough Surface: Principles and Applications* (Academic Press, 2000), 417 p.
- 15 V.M. Yurov, *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* 11, 389 (2019). (In Russ.)
- 16 V.M. Yurov, V.I. Goncharenko, V.S. Oleshko, and M. Sha, *Eurasian Phys. Tech. J.* 18, 15 (2021).
- 17 N.F. Uvarov and V.V. Boldyrev, *Uspekhi Khimii* 70, 307 (2001). (In Russ.)
- 18 V.M. Yurov, V.I. Goncharenko, and V.S. Oleshko, *Pis'ma v ZhTF* 49, 35 (2023). (In Russ.)
- 19 V.M. Yurov, S.A. Guchenko, V.Ch. Laurinas, and O.N. Zavatskaya, *Bull. Karaganda Univ. “Phys. Ser.”* 1(93), 50 (2019).
- 20 E.S. Mashkina, *Spektral'nyi analiz teplovykh fluktuatsii v perekhodnykh oblastiakh predplavleniya KI (Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy, 2020)*, 22(2), 238–244. (In Russ.)
- 21 H. Gleiter, *Acta Mater.* 48, 1 (2000).
- 22 A.I. Gusev, *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* (Fizmatlit, Moscow, 2005), 412 p. (In Russ.)
- 23 P. Buffat and J.P. Borel, *Phys. Rev. A* 13, 2287 (1976).
- 24 V.M. Yurov, V.Ch. Laurinas, and S.A. Guchenko, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika* 6, 347 (2019). (In Russ.)
- 25 V.M. Yurov, *Razmernye efekty v lyuminestsentsii kristallofosforov*, in *Sb. st. Mezhdunarodnoi LXXIV nauchno-prakticheskoi konferentsii (pamyati A.L. Chizhevskogo)* (EFIR, Moscow, 2020), pp. 6–12. (In Russ.)
- 26 A.M. Shikin and V.K. Adamchuk, *FTT* 50, 1121 (2008). (In Russ.)
- 27 V.D. Krevchik, *Kvazyi i kvantovoe tunnelirovanie s dissipatsiei* (Inzhiniring i Tekhnologii, 2016), 1(1), 1–18. (In Russ.)
- 28 V.M. Yurov, V.I. Goncharenko, and V.S. Oleshko, *Proc. Intern. Conf. “Scientific Research of SCO Countries: Synergy and Integration”* (Beijing, 2024), pp. 203–209.
- 29 D.V. Livanov, *Fizika Metallov (MISiS, Moscow, 2006)*, 280 p. (In Russ.)
- 30 E.G. Lazareva and T.V. Emelyanova, *Teorema o zamene peremennoi v integrale Lebega. Izbrannye lektzii* (Izdatel'skii Dom TGU, Tomsk, 2019), 40 p. (In Russ.)
- 31 Frolov and A. Schwarz, *Quantum mechanics and quantum field theory*, arXiv:2301.03804v1 [quant-ph] (2023), 100 p.
- 32 K. Rebbe, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* 130, 329 (1980). (In Russ.)
- 33 A.B. Borisov and V.V. Kiselev, *Dvumer i trekhmer topologicheskie defekty* (Fizmatlit, Moscow, 2022), 456 p. (In Russ.)
- 34 M.A. Knyazem and D.A. Rusakevich, *Otsenka energii svyazi solitona vblizi poverkhnosti metalla* (BNTU, Minsk, 2017), pp. 267–269. (In Russ.)
- 35 S.A. Starikov, A.R. Kuznetsov, and V.V. Sagaradze, *Fiz. Met. Met.* 122, 1296 (2021). (In Russ.)
- 36 S.V. Dmitriev, E.A. Korznikova, Y.A. Baimova, and M.G. Velarde, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* 186, 471 (2016). (In Russ.)
- 37 E.A. Korznikova, S.Y. Fomin, and S.V. Dmitriev, *Lokalizovannye kolebaniya v dvumernykh reshetkakh* (Naukoemkie Tekhnologii, Saint Petersburg, 2018), 130 p. (In Russ.)
- 38 M.D. Starostenkov, P.V. Zakharov, and N.N. Medvedev, *Izv. AltGU* 108, 49 (2019). (In Russ.)

- 39 A.I. Rusanov, Zh. Obshch. Khim. 72, 532 (2002). (In Russ.)
40 L.A. Borinyak and A.P. Chernyshov, Metod rascheta ekvivalentnoi temperatury spekaniya nanoporoshkov (Obrabotka Metallov, 2013), 2(59), 39–43. (In Russ.)
41 X. Fan, X. Chen, D. Pan, Y. Liu, P. Liu, and M. Li, Phys. Rev. B 104, 134204 (2021).
42 I.V. Antonets, L.N. Kotov, S.V. Nekipelov, and E.N. Karpushov, ZhTF 74, 102 (2004). (In Russ.)
43 V.E. Panin and Y.V. Grinyaev, Fizicheskaya Mezomekhanika 6, 9 (2003). (In Russ.)
44 M.V. Moskalyets, Osnovy mezoskopicheskoi fiziki (NTU - KhPI, Kharkiv, 2010), 180 p. (In Russ.)
45 H. Jäger and W. Frohs, Industrial Carbon and Graphite Materials (Wiley-VCH, 2022), 991 p.
46 K.S. Novoselov, Uspekhi Fizicheskikh Nauk 181, 1299 (2011). (In Russ.)
47 V.M. Yurov and K.N. Zhangozin, Znanstvena misel 86, 41 (2024).
48 V. Yurov and K. Zhangozin, Intern. Indep. Sci. J. 58, 29 (2024).
49 Q. Xu, X. Li, J. Zhang, Y. Hu, H. Wang, and T. Ma, ACS Appl. Mater. Interfaces 9, 40959 (2017).
50 A.V. Eletskiy, I.M. Iskandarova, A.A. Knizhnik, and D.N. Krasikov, Uspekhi Fizicheskikh Nauk 181, 233 (2011). (In Russ.)
51 A.V. Rozhkov, A.O. Sboychakov, A.L. Rakhmanov, and F. Noria, Phys. Rep. 648, 1 (2016).
52 A.I. Podlivaev, Pis'ma v ZhETF 115, 384 (2022). (In Russ.)
53 M.F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, J.B. Oostinga, A.F. Morpurgo, and S. Tarucha, Nature Nanotechnol. 4, 383 (2009).
54 T. Devakul, P.J. Ledwith, L.-Q. Xia, A. Uri, S. de la Barrera, P. Jarillo-Herrero, and L. Fu, Sci. Adv. 9, eadi6063 (2023).

История статьи:

Поступила – 06.06.2024

Принята – 18.08.2024

Article history:

Received 6 June 2024

Accepted 18 August 2024

Информация об авторах:

1. **В.М. Юров** (автор-корреспондент) – док.физ.-мат.наук., профессор, ТОО «ТСК Восток», г. Караганда, г.Астана, Казахстан, e-mail: exciton@list.ru
2. **В.И. Гончаренко** – Докт.тех.наук, профессор, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия, e-mail: vladimirgonch@mail.ru
3. **В.С. Олешко** – канд.тех.наук, доцент, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия, e-mail: OleshkoVS@mai.ru
4. **К.Н. Жангозин** – ТОО «ТСК Восток», г. Караганда, г.Астана, Казахстан, e-mail: exciton@list.ru

Information about authors:

1. **V.M. Yurov** (corresponding author)– Dr. of Phys. and Math. Sc., Prof., TSC Vostok LLP, Karaganda, Astana, Kazakhstan, e-mail: exciton@list.ru
2. **V.I. Goncharenko** – Dr. Tech.Sci., Prof., Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: vladimirgonch@mail.ru
3. **V.S. Oleshko** – Cand. Tech.Sci., Ass. Prof., Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: OleshkoVS@mai.ru
4. **K.N. Zhangozin** – TSC Vostok LLP, Karaganda, Astana, Kazakhstan, e-mail: exciton@list.ru