

МРНТИ 29.19.22

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2021.v76.i1.06>**В.М. Юров**

Карагандинский университет имени Е.А. Букетова, Казахстан, г. Караганда,
e-mail: exciton@list.ru

АНИЗОТРОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ КРЕМНИЯ

Предложена эмпирическая модель поверхностного слоя металла, состоящая из слоев R_0 , $R(I)$, $R(II)$, R_{∞} . Слой R_0 называется слоем де Бройля $R_0 = \lambda_{dB} = \hbar/p$ и для металлов составляет от 0,01 нм до 0,1 нм. В этом слое начинаются квантовые размерные эффекты. Размерные эффекты в слое $R(I)$ определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие «квазиклассические» размерные эффекты наблюдаются только в наноструктурах и для металлов составляют от 1 нм до 7 нм. Слой $R(II)$ простирается примерно до размера $R(II) \approx 9R = R_{\infty}$ (< 100 нм), где начинается объемная фаза. В слое $R(II)$ должно быть много размерных эффектов, связанных с оптикой, магнетизмом и другими физическими свойствами. Уравнение Русанова А.И., связывающее поверхностную энергию с размером частицы, справедливо только в слое $R(I)$. Учет этого уравнения в нашей модели приводит к анизотропии кристаллической решетки металла. В работе Шебзуховой и Арефьевой методом электронно-статистического расчета анизотропии поверхностной энергии металлов определен метод оценки для работы выхода электронов из металла. В работе Бокарева анизотропия поверхностной энергии монокристаллов рассчитана из модели координационного плавления кристаллов. В предложенной нами эмпирической модели рассчитывается не только анизотропия, но и толщина поверхностного слоя для пористого кремния.

Ключевые слова: пористый кремний, поверхностный слой, атомный объем, наноструктура.

V.M. Yurov

E.A. Buketov Karaganda University, Kazakhstan, Karaganda,
e-mail: exciton@list.ru

Anisotropy of silicon surface energy

An empirical model of a metal surface layer is proposed, consisting of layers R_0 , $R(I)$, $R(II)$, R_{∞} . The R_0 layer is called the de Broglie layer $R_0 = \lambda_{dB} = \hbar/p$ and for metals ranges from 0.01 nm to 0.1 nm. Quantum dimensional effects begin in this layer. The size effects in the $R(I)$ layer are determined by the entire collective of atoms in the system (collective processes). Such "quasi-classical" size effects are observed only in nanostructures and for metals they range from 1 nm to 7 nm. The $R(II)$ layer extends approximately to the size $R(II) \approx 9R = R_{\infty}$ (< 100 nm), where the bulk phase begins. The $R(II)$ layer should have many dimensional effects associated with optics, magnetism, and other physical properties. The Rusanov A.I. equation relating the surface energy to the particle size is valid only in the $R(I)$ layer. Taking this equation into account in our model leads to anisotropy of the metal crystal lattice. In the work of Shebzukhova and Aref'eva, by the method of electronic-statistical calculation of the anisotropy of the surface energy of metals, a method was determined for the work function of electrons from a metal. In Bokarev's work, the anisotropy of the surface energy of single crystals was calculated from the model of coordination melting of crystals. In our proposed empirical model, not only the anisotropy is calculated, but also the thickness of the surface layer for porous silicon.

Key words: porous silicon, surface layer, atomic volume, nanostructure.

В.М. Юров

Е.А. Букетов атындағы Қарағанды университеті, Қазақстан, Қарағанды қ.
e-mail: exciton@list.ru

Силимий бетінің энергиясының анизотропиясы

R_0 , $R(I)$, $R(II)$, R_{∞} қабаттарынан тұратын металл беткі қабатының эмпирикалық моделі ұсынылған. R_0 қабаты де-Бройль қабаты деп аталады $R_0 = \lambda_{dB} = \hbar/p$ және металдар үшін 0,01 нм-ден 0,1 нм-ге дейін. Кванттық өлшемдік эффекттер осы қабаттан басталады. $R(II)$ қабатындағы көлемдік эффекттерді жүйедегі барлық атомдар жиынтығы анықтайды (ұжымдық процестер). Мұндай «квази-классикалық» көлемдік әсерлер тек наноқұрылымдарда

байқалады және металдар үшін олар 1 нм-ден 7 нм аралығында болады. $R(II)$ қабаты шамамен $R(II) \approx 9R = R_*$ (< 100 нм) мөлшеріне дейін созылады, мұнда негізгі фаза басталады. $R(II)$ қабаты оптика, магнетизм және басқа физикалық қасиеттермен байланысты көптеген өлшемді эффекттерге ие болуы керек. Беттік энергияны бөлшектердің мөлшеріне қатысты А.И. Русановтың теңдеуі тек $R(I)$ қабатында жарамды. Біздің модельде осы теңдеуді ескеру металл кристалды торының анизотропиясына әкеледі. Шебзухова мен Арефиеваның жұмыстарында металдардың беткі энергиясының анизотропиясын электронды-статистикалық есептеу әдісі арқылы металдардан электрондардың жұмыс функциясын бағалау әдісі анықталды. Бокаревтың жұмысында монокристалдардың беткі энергиясының анизотропиясы кристалдардың координациялық балқу үлгісінен есептелген. Біз ұсынған эмпирикалық модельде тек анизотропия ғана емес, сонымен қатар кеуекті кремнийге арналған беткі қабаттың қалыңдығы да есептеледі.

Түйін сөздер: кеуекті кремний, беткі қабат, атом көлемі, нанокұрылым.

Введение

Настоящая работа является продолжением работы [1], где описана предложенная нами модель поверхностного слоя атомарно-гладких металлов. Здесь эту модель мы используем для анализа анизотропии поверхностной энергии кремния σ_{Si} , как основного материала микро- и нанoeлектроники. Gilman J. [2] (1960) первым определил значение σ_{Si} путем раскалывания монокристалла Si при температуре 78 К вдоль грани (111). Оно оказалось равным $1,240$ Дж/м². После этого такие измерения не проводились. Спустя более 50 лет в работе [3] была проведена оценка поверхностной энергии твердого кремния при температуре плавления. Использовался метод «капли» между твердым кремнием и краевым углом, который образуется между кремнием и жидким металлом. Полученное значение σ_{Si} при температуре 693 К оказалось равным $1,117$ Дж/м² без учета анизотропии.

Анизотропия физических свойств кристаллов начала привлекать к себе внимание в связи с переходом в нанообласть, где ориентация и размер играют важную роль [4-6]. Meng et al. [7] сосредоточили внимание на влиянии кристаллографической анизотропии на 6H-SiC деформации скольжения и производительность наномеханической обработки. Sang et al. [8] наблюдали очевидную упругую анизотропию в стекле и обнаружили, что упругая анизотропия показывает сильную корреляцию с молекулярной ориентацией. Chen et al. [9] провели исследование резки SiO₂ и обнаружили, что кристаллографическая ориентация (100) имеет большой диапазон распространения повреждений. Zhao et al. [10] моделировали режимы трещинного разрушения стеклянного слоя и слоя кремния с помощью (100), (110) и (111) поверхности. Изменения качества кромки трещины в разных

направлениях резания и в разных слоях было исследовано. Было обнаружено, что анизотропия кремниевого слоя оказывает важное влияние на разрушение и качество кромок трещин двух слоев. Rickhey et al. [11] проанализировали изменение размера трещины в ориентациях Si (001), Si (110) и Si (111), которые хорошо согласуются с экспериментом и доказал рациональность упрощенной численной модели. Эти исследования анизотропии твердых и хрупких кристаллических материалов обеспечивают хорошие теоретические и экспериментальные ссылки для развития трещин материала в процессе обработки. Кроме того, изменение ориентации кристаллов также оказывает значительное влияние на трение и эластичность между хрупкими материалами.

Guilian Wang et al. [12] особо тщательно исследовали монокристалл кремния. Результаты моделирования показывают, что поверхность Si (010) накапливает стружку легче, чем поверхности Si (011) и Si (111). Кристаллы Si (010) и Si (011) деформируются по всей стенке пор, а кристаллы Si (111) обладают локально большей деформацией на входных участках пор. Поры вызывают колебания тангенциальной и нормальной силы. Диапазон колебаний тангенциальной силы невелик, а диапазон колебаний нормальной силы – большой. Кристаллографические ориентации в основном влияют на положение тангенциальной силы, которая достигает максимального и минимального значений.

Анизотропии поверхностной энергии металлов посвящено значительное число работ, поскольку ее необходимо учитывать при решении практических задач, с которыми сталкиваются и техники, и технологи. Например, в микроэлектронной промышленности уже используются материалы с проектными нормами

16-14 нм, и осваиваются технологии с проектными нормами на уровне 10-7 нм. Однако такой переход в нанобласть требует перехода на работу с новыми материалами. При этом величины, упомянутых выше областей, определяют их размерную зависимость и на свойства материалов существенную зависимость оказывать поверхностная энергия кристалла и ее анизотропия.

В работах [13, 14] методом электронно-статистического расчета поверхностной энергии металлов определен метод оценки для работы выхода электронов из металла со структурами, имеющими гексагональную и ромбическую сингонию. Получена связь поверхностной энергии и работой выхода электрона. Эти расчеты проведены для кристаллов цинка, кадмия и ртути.

В работах [15, 16] рассмотрена связь анизотропии поверхностной энергии монокристаллов с кристаллической структурой. Основываясь на экспериментальных исследованиях и теоретических расчетах, показано, что модель координатного плавления кристаллов однозначно связывает физико-химические свойства поверхности монокристаллов с их кристаллической структурой.

Основная цель настоящей работы, это построение модели поверхностного слоя совершенных монокристаллов кремния и выяснение роли поверхностной энергии в физических процессах, протекающих в области наноразмеров.

Описание эмпирической модели

Нами в работах [1, 17] дано описание модели, которая состоит из 4-х слоев. Слой де Бройля $R_0 = \lambda_{дБ} = \hbar/p$ для металлов составляет от 0,01 нм до 0,1 нм. В этом слое начинаются квантовые размерные эффекты. К основным квантово размерным структурам относятся структуры с двумерным электронным газом – эпитаксиальные пленки, МДП-структуры, гетероструктуры и т.д.; структуры с одномерным газом – квантовые нити или проволоки; структуры с нульмерным газом – квантовые точки, ящики, кристаллиты [18].

Слой $R(I)$ описывается первой зависимостью $r \gg R(I)$. В слое $R(I)$ с атомами чистых металлов происходит реконструкция и релаксация, связанная с перестройкой поверхности [19]. Для золота постоянная решетки равна $R(I) = 0.41$ нм и поверхность перестраивается на

расстоянии $R(I)_{Au} = 1.2/0.41 \approx 3$ трех атомных монослоев. Размерные эффекты в слое $R(I)$ определяются всем коллективом атомов в системе (коллективные процессы). Такие «квазиклассические» размерные эффекты наблюдаются только в наночастицах и наноструктурах [20]. Экспериментально их можно наблюдать на очень чистых монокристаллах при скользящем падении рентгеновского излучения, когда угол падения равен или меньше критического угла полного внутреннего отражения [19]. Когда угол падения становится меньше критического, преломленная волна экспоненциально затухает в объеме на характерной глубине порядка нескольких нанометров (например, для кремния эта глубина 3,2 нм, а для золота 1,2 нм). В результате формируется, так называемая, исчезающая волна, которая распространяется параллельно поверхности. Поэтому дифракция таких волн дает информацию о структуре поверхностного слоя [19].

Слой $R(II)$ простирается примерно до размера $R(II) \approx 9R = R_\infty$, где начинается объемная фаза. С этого размера начинаются размерные свойства. Под наноматериалами принято понимать материалы, основные структурные элементы которых не превышают нанотехнологической границы ~ 100 нм, по крайней мере, в одном направлении [20]. 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. [21-23]. Значит в слое $R(II)$ должно быть много размерных эффектов, связанных с оптикой, магнетизмом и другими физическими свойствами согласно уравнению (10).

Слой $R(II)$ описывается второй зависимостью $R_0 < r < R(I)$. Нами в работе [17], показано, что с точностью до 3% выполняется соотношение:

$$\sigma = 10^{-3} \cdot T_m, \quad (1)$$

где T_m – температура плавления твердого тела (К). Соотношение выполняется для всех металлов и для других кристаллических соединений. При $T = T_m$ из уравнения [17] получаем:

$$R(I)_i = 0.24 \cdot 10^{-9} v. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что толщина поверхностного слоя $R(I)$ определяется одним фундаментальным параметром – молярным (атомным) объемом элемента $v=M/\rho$, M – молярная масса (г/моль), ρ – плотность (г/см³), который периодически изменяется в соответствие с таблицей Д.И. Менделеева.

Уравнение (11) эмпирически можно переписать в виде:

$$\sigma(hkl) = 10^{-3} \cdot T_m \cdot l(hkl), \quad (3)$$

где $l(hkl)$ для кристаллов с объемноцентрированной (ОЦК) и гранецентрированной (ГЦК) решетками.

Кристаллическая решетка кремния кубическая гранецентрированная (с параметром $a = 0,54397$ нм, молярная масса $M = 28,086$ г/моль, плотность $\rho = 2,33$ г/см³), которую можно рассчитать:

$$Fd3m, Z = 4; l_{100} = a; l_{110} = a/\sqrt{2}; l_{111} = 2a/\sqrt{3}. \quad (4)$$

Значения ρ , M , T_m для кремния возьмем из справочника. В таблице 1 представлены расчеты анизотропии поверхностной энергии по (3) в сопоставлении с расчетами анизотропии поверхностной энергии по нескольким теоретическим и экспериментальным моделям.

Таблица 1 – Анизотропия поверхностной энергии кремния, рассчитанная по (3) в сопоставлении с анизотропией поверхностной энергией, определенной в работах [2, 3]

Кремний	(hkl)	Структура	T_m , К	$R(I)$, нм	σ_{hkl} по (3) мДж/м ²	σ_{hkl} по [2] мДж/м ²	σ_{hkl} по [3] мДж/м ²
Si	100	Fd3m	1688	2,9 (5)	1,688	-	1,117
	110				1,206	-	
	111				1,929	1,240	

Обсуждение результатов расчетов

Прежде всего отметим, что толщина поверхностного слоя кремния равна 2,9 нм и содержит 5 монослоев. На чистых монокристаллах кремния, при скользящем падении рентгеновского излучения, эта толщина оказалась равной 3,1 нм [19], что также близко к полученному нами. Число монослоев также находится на уровне числа монослоев у золота (3), где происходит перестройка поверхности. В направлении (110) толщина поверхностного слоя кремния равна 2,1 нм и содержит 4 монослоев, а направлении (111) – она равна 3,3 нм и содержит 8 монослоев.

Поверхностная энергия кремния изменяется от 1,240 Дж/м² при 78 К до 1,929 Дж/м² при 1688 К. Отсюда нетрудно вычислить температурный коэффициент $\sigma = \alpha T$, который равен $\alpha \approx 10^{-3}$ и полностью совпадает с уравнением (1).

Анизотропия поверхностной энергии приводит к тому, что температура плавления различных граней становится различной и при уменьшении размера частиц она изменяется по закону Гиббса-Толмена-Кенига-Баффа:

$$T(r) = T_0 \left(1 - \frac{2\delta}{r} \right), \quad (5)$$

где δ называется постоянной Толмена и определить ее экспериментально невозможно. Она порядка 1-2 атомных радиусов.

В работе [24] нами получено аналогичное уравнение:

$$T(r) = T_0 \left(1 - \frac{R(I)}{r} \right), \quad (6)$$

где параметр $R(I)$ определен выше и равен числу монослоев:

$$R(I) = \frac{2\sigma v}{RT}, \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная (остальные параметры известны).

В таблице 2 показана анизотропия температуры плавления для поверхности Si.

Из таблицы 2 видно, что в плоскости (111) температура плавления почти в 2 раза меньше, чем в плоскости (110) и поэтому она плавится и

кристаллизуется при более низкой температуре. Нами в работе [25] рассмотрена модель плавления наночастиц любых твердых тел. Темпера-

тура плавления наночастиц определяется одним параметром, который связан с молярным объемом твердого тела.

Таблица 2 – Анизотропия температуры плавления для поверхности Si.

Кремний	(hkl)	Структура	T ₀ , К	R(I), нм	T(5 нм), К
Si	100	Fd3m	1688	2,9	709
	110			2,1	979
	111			3,3	574

Размерная зависимость температуры плавления наночастиц вычислена для металлов, диэлектриков, полупроводников, полимеров и металлических стекол. Сравнение с экспериментом проведено для металлов. Полученные данные расчета неплохо согласуются с экспериментом. Если принять комнатную температуру за 300 К, полимеры будут существовать с размерами 50 нм и выше. Это также относится и к диэлектрикам. Наночастицы чистых металлов, полупроводников и металлических стекол стабильны при любых температурах и при размерах порядка 1 нм. Для нанoeлектроники этот вопрос имеет существенное значение.

Обратимся теперь к анализу работ [4-12], где особо тщательно исследовали монокристалл кремния. Результаты моделирования показывают, что поверхность Si (010) накапливает при резании стружку легче, чем поверхности Si (011) и Si (111). Это значит, что наблюдается резкая анизотропия поверхностной энергии граней.

Авторами [26] предложен универсальный, общий показатель схватывания, охватывающий удар, трение, и резание металлов:

$$\ddot{I} = \frac{\sigma}{t_p}, \quad (8)$$

где σ – поверхностная энергия грани, t_p – длительность релаксации напряжений в зоне резания.

Ясно, что грань Si (111) обладает большей энергией, чем остальные и служит своего рода энергией активации, для преодоления которой нужно затратить большую энергию.

Поскольку, поверхностная энергия пропорциональна R(I), что следует непосредственно из уравнения (7), то это значит, что следует ожидать и анизотропию пористого кремния. Степень пористости P кремния Si определяется как:

$$P = 1 - \rho_{iE} / \rho_{Si}, \quad (9)$$

где $\rho_{ПК}$ – плотность пористого кремния (ПК), ρ_{Si} – плотность монокристалла.

Если подставить уравнение (9) в уравнение (2), то получим:

$$R(I)_{iD} = R(I)_{Si} / (1 - P). \quad (10)$$

Типичное значение пористости Si имеет значение 40-70 %, а при сверхкритическом высушивании [27] достигает 95 %. Из уравнения (10) вытекает следующая таблица 3.

Таблица 3 – Анизотропия пористого кремния

	(hkl)	P=40 %	P=50 %	P=60 %	P=70 %	P=80 %	P=90 %
R(I) ₁₀₀	100	4,83	5,00	7,25	9,67	14,5	29,0
R(I) ₁₁₀	110	3,50	4,20	5,25	7,00	10,5	21,0
R(I) ₁₁₁	111	5,50	6,60	8,25	11,0	16,5	33,0
σ_{100}	100	2,813	3,376	4,220	5,627	8,44	16,88
σ_{110}	110	2,010	2,412	3,015	4,020	6,03	12,06
σ_{111}	111	3,215	3,858	4,823	6,430	9,65	19,29

Таблица 3 демонстрирует существенную анизотропию пористого кремния.

Казахстанские ученые показали [28-30], что основным препятствием для применения пористого кремния в оптоэлектронике является нестабильность его люминесцентных свойств и деградация фотолюминесценции, как в процессе старения на воздухе, так и под действием термического воздействия, кроме того термические обработки поверхности пористого кремния существенно изменяют локализацию поверхностного состояния.

Заключение

Представленные формулы (1) – (4) позволили сделать расчеты анизотропии толщины поверхностного слоя и анизотропии поверхностной энергии кремния в направлении (100), (110) и (111). Анизотропия поверхностной энергии приводит к тому, что температура плавления

различных граней становится различной. Результаты исследования показывают, что поверхность Si (010) накапливает при резании стружку легче, чем поверхности Si (011) и Si (111). Это значит, что наблюдается резкая анизотропия поверхностной энергии граней. Ясно, что грань Si (111) обладает большей энергией, чем остальные и служит своего рода энергией активации, для преодоления которой нужно затратить большую энергию.

Поскольку, поверхностная энергия пропорциональна $R(I)$, то это значит, что следует ожидать и анизотропию пористого кремния. Таблица 3 демонстрирует существенную анизотропию пористого кремния.

Благодарность

Работа выполнена по программе Министерства образования и науки Республики Казахстан. Гранты №0118PK000063 и №Ф.0781.

Литература

- 1 Юров В.М. Толщина поверхностного слоя пористого кремния //Вестник КазНУ, серия физическая, 2020, №1(72). – С. 60-66.
- 2 Gilman J. Direct Measurements of the surface energies of crystals //J. Appl. Phys. –1960. – Vol. 31, № 2. – P. 2208-2216.
- 3 Дохов М.П. Определение межфазных характеристик по смачиваемости кремния некоторыми жидкими металлами //Фундаментальные исследования. – 2016. – №8. – С. 29-33.
- 4 Kim K.S., Hwang J.W., Lee K.A. Effect of building direction on the mechanical anisotropy of biocompatible Co-Cr-Mo alloy manufactured by selective laser melting process //J. Alloys Compd. – 2020. – Vol.834. – Art.No 155055.
- 5 Lin B.C., Chen W., Yang Y., Wu F., Li Z. Anisotropy of microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb fabricated by electron beam melting //J. Alloys Compd. – 2020. – Vol.830. – Art. No 154684.
- 6 Grassi E.N.D., Chagnon G., de Oliveira H.M.R., Favier D. Anisotropy and clausius-clapeyron relation for forward and reverse stress-induced martensitic transformations in polycrystalline NiTi thin walled tubes //Mech. Mater. – 2020. – Vol.146. – Art. No 103392.
- 7 Meng B., Yuan D., Xu S. Atomic-Scale characterization of slip deformation and nanometric machinability of single-crystal 6H-SiC //Nanoscale Res. Lett. – 2019. – Vol. 14. – P. 309-314.
- 8 Cang Y., Wang Z., Bishop C., Yu L., Ediger M.D., Fytas G. Extreme elasticity anisotropy in molecular glasses //Adv. Funct. Mater. – 2020. – Vol.30. – Art. No 2001481.
- 9 Chen J., Li M., Wang F., Lu L., Qin J., Shang Q., Miao X., Niu L., Liu H., Zhou, G. et al. Effects of anisotropy on single-crystal SiO₂ in nano-metric cutting //Adv. Mech. Eng. –2020. – Vol.12. – 1687814019895163.
- 10 Zhao C., Cai Y., Ding Y., Yang L., Wang Z., Wang Y. Investigation on the crack fracture mode and edge quality in laser dicing of glass-anisotropic silicon double-layer wafer //J. Mater. Process. Technol. – 2020. – Vol. 275. – Art. No 116356.
- 11 Rickhey F., Marimuthu K.P., Lee K., Lee H. Indentation cracking of monocrystalline silicon considering fracture anisotropy //Theor. Appl. Fract. Mech. – 2019. – Vol.100. – P.128-138.
- 12 Guilian Wang, Zhijian Feng, Yahui Hu, Jie Liu and Qingchun Zheng. Effects of Anisotropy on Single Crystal Silicon in Polishing Non-Continuous Surface //Micromachines. – 2020. – Vol. 742, No. 11. – P.2-16.
- 13 Шебзухова И.Г., Арефьева Л.П. Анизотропия поверхностной энергии и работы выхода электрона ПВ металлов //Журнал технической физики. – 2019. – Том 89, вып. 2. – С. 306-309.
- 14 Шебзухова И.Г., Арефьева Л.П. Оценка поляризационной и дисперсионной поправок к поверхностной энергии граней металлических кристаллов //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 319-325.
- 15 Бокарев В.П., Красников Г.Я. Анизотропия физико-химических свойств монокристаллических поверхностей //Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2016, №4(164). – С. 25-30.

- 16 Бочкарев В.П. Развитие физико-химических принципов оценки влияния поверхностной энергии на свойства материалов и процессы для технологии микроэлектроники. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва. – 2020. – 299 с.
- 17 Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента. //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 691-699.
- 18 Арутюнов К.Ю. Квантовые размерные эффекты в металлических наноструктурах //ДАН ВШ РАН. – 2015. – №3(28). – С.7-16.
- 19 Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
- 20 Уваров Н.Ф., Болдырев В.В. Размерные эффекты в химии гетерогенных систем //Успехи химии. – 2001. – Т.70(4). – С. 307-329.
- 21 Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 412 с.
- 22 Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.
- 23 Суздаев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
- 24 Юров В.М. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 389-397.
- 25 Юров В.М., Маханов К.М. Оценка температуры плавления наноструктур твердых тел //Нано- и микросистемная техника. – 2020. – Т. 22, №7. – С. 347-351.
- 26 Ставровский М.Е., Албагачиев А.Ю., Сидоров М.И. Моделирование адгезии при контактном взаимодействии металлов //Современные материалы, техника и технологии. – 2016, № 7. – С. 168-173.
- 27 Lehmann V., Ronnebeck S. The Physics of Macropore Formation in Low-Doped p-Type Silicon //Journal of The Electrochemical Society. – 1999. – Vol.146, №. 8. – P. 2968-2975.
- 28 Жанабаев З.Ж., Асанов Г.С., Ибраимов М.К., Сагидолда Е. Генератор хаотических сигналов на наноразмерной пленке из пористого кремния //Инновационный патент KZ 23594, 15.12.2010. Опубликовано 15.12.2015, бюл. №12. – 4 с.
- 29 Тыныштыкбаев К.Б., Рябикин Ю.А., Токмолдин С.Ж., Айтмуқан Т., Рақымбетов Б.А., Верменичев Р.Б. Особенности морфологии пористого кремния, полученного при длительном анодном травлении в электролите с внутренним источником тока. //Вестник Алматинского института энергетики и связи. – 2010. – №1(8). – С. 36-40.
- 30 Мурзалинов Д.О. Плазменно-ассистируемое и ионно-лучевое формирование светоизлучающих структур на основе слоев нитрида кремния на кремнии. – Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD), Астана, 2018. – 93 с.

References

- 1 V.M. Yurov, Rec. Contr. Phys., 1(72), 60-66 (2020) (in Russ).
- 2 J. Gilman, J. Appl. Phys., 31 (2), 2208-2216 (1960).
- 3 M.P. Dokhov, Fundamental research, 8, 29-33 (2016) (in Russ).
- 4 K.S. Kim, J.W. Hwang, K.A. Lee, J. Alloys Compd., 834, 155055 (2020).
- 5 B.C. Lin, W. Chen, Y. Yang, F. Wu, Z. Li, J. Alloys Compd., 830, 154684 (2020).
- 6 E.N.D. Grassi, G. Chagnon, H.M.R. de Oliveira, D. Favier, Mech. Mater., 146, 103392 (2020).
- 7 B. Meng, D. Yuan, S. Xu, Nanoscale Res. Lett., 14, 309-314 (2019).
- 8 Y. Cang, Z. Wang, C. Bishop, L. Yu, M.D. Ediger, G. Fytas, Adv. Funct. Mater., 30, 2001481 (2020).
- 9 J. Chen, M. Li, F. Wang, L. Lu, J. Qin, Q. Shang, X. Miao, L. Niu, H. Liu, G. Zhou, Adv. Mech. Eng. 12, 1687814019895163 (2020).
- 10 C. Zhao, Y. Cai, Y. Ding, L. Yang, Z. Wang, Y. Wang, J. Mater. Process. Technol., 275, 116356 (2020).
- 11 F. Rickhey, K.P. Marimuthu, K. Lee, H. Lee, Theor. Appl. Fract. Mech., 100, 128-138 (2019).
- 12 Guilian Wang, Zhijian Feng, Yahui Hu, Jie Liu and Qingchun Zheng, Micromachines, 742 (11), 2-16 (2020).
- 13 I.G. Shebzukhova, L.P. Arefieva, Journal of technical physics, 89 (2), (2019) (in Russ).
- 14 I.G. Shebzukhova, L.P. Arefieva, Physicochemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials, 12, 319-325 (2020).
- 15 V.P. Bokarev, G.Ya. Krasnikov, Electronic technology. Series 3. Microelectronics, 4 (164), 25-30 (2016) (in Russ).
- 16 V.P. Bochkarev, Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Moscow, 2020, 299 p. (in Russ).
- 17 V.M. Yurov, S.A. Guchenko, V.Ch. Laurinas, Physicochemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials, 10, 691-699 (2018). (in Russ).
- 18 K.Yu. Arutyunov, Dokl. VSh RAN, 3(28), 7-16 (in Russ).
- 19 K. Oura, V.G. Lifshits, A.A. Saranin, A.V. Zotov, M. Katayama, Introduction to Surface Physics, (Moscow, Science, 2006), 490 p. (in Russ).
- 20 N.F. Uvarov, V.V. Boldyrev, Uspekhi khimii, 70(4), 307-329 (2001) (in Russ).
- 21 A.I. Gusev, Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology, (Moscow, Fizmatlit, 2005), 412 p. (in Russ).

- 22 R.A. Andrievsky, A.V. Ragulya, Nanostructured materials, (Moscow, Publishing Center "Academy", 2005), 192 p. (in Russ).
- 23 I.P. Suzdalev, Nanotechnology: physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials, (Moscow, KomKniga, 2006), 592 p. (in Russ).
- 24 V.M. Yurov, Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials, 11, 389-397 (2019). (in Russ).
- 25 V.M. Yurov, K.M. Makhanov, Nano- and microsystem technology, 22 (7), 347-351 (2020). (in Russ).
- 26 M.E. Stavrovsky, A.Yu. Albagachiev, M.I. Sidorov, Modern materials, equipment and technologies, 7, 168-173 (2016). (in Russ).
- 27 V. Lehmann, S. Ronnebeck, Journal of The Electrochemical Society, 146 (8), 2968-2975 (1999).
- 28 Z.Zh. Zhanabaev, G.S. Asanov, M.K. Ibraimov, E. Sagidolda, Innovative patent KZ 23594, 15.12.2010. Published on December 15, 2015, bul. No. 12. – 4 p. (in Russ).
- 29 K.B. Tynyshtykbaev, Yu.A. Ryabikin, S.Zh. Tokmoldin, T. Aitmukan, B.A. Rakymetov, R.B. Vermenichev, Bulletin of the Almaty Institute of Energy and Communications, 1(8), 36-40 (2010). (in Russ).
- 30 D.O. Murzalinov, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD), Astana, 2018. – 93 p. (in Russ).