



УДК 539.013

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.175.179

АНИЗОТРОПИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ И ЕЕ РОЛЬ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

ANISOTROPY OF CRYSTALS SURFACE PROPERTIES AND ITS ROLE IN MICROELECTRONIC TECHNOLOGY

БОКАРЕВ ВАЛЕРИЙ ПАВЛОВИЧ

vbokarev@niime.ru

BOKAREV VALERIY P.

vbokarev@niime.ru

КРАСНИКОВ ГЕННАДИЙ ЯКОВЛЕВИЧ

KRASNIKOV GENNADY YA.

ГОРНЕВ ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ

GORNEV EVGENY S.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

Тел.: +7 (495) 229-70-43

Molecular Electronics Research Institute JSC

bld. 1, 12 1st Zapadny Lane, Zelenograd,

Moscow, 124460, Russia

Tel.: +7 (495) 229-70-43

С использованием модели координационного плавления кристаллов проведены расчеты анизотропии поверхностной энергии кристаллических материалов, используемых в кремниевой технологии. На основе проведенных расчетов и экспериментальных данных рассчитана анизотропия работы выхода электрона из разных граней кристаллов Al, Cu, Au, Ni, Ta, Cr, W и температура их поверхностного плавления. Показана связь между физико-химическими свойствами кристаллографически разных поверхностей металлов кубической сингонии с поверхностным расположением атомов, входящих в первые координационные сферы.

Ключевые слова: анизотропия; поверхностная энергия; работа выхода электрона; поверхностное плавление; модель координационного плавления; первая координационная сфера атомов.

Anisotropy of the surface energy of crystal materials used in the silicon technology has been calculated with a model of coordination melting. Based on these calculations and some experimental data, anisotropies of electron work function on different faces of Al, Cu, Au, Ni, Ta, Cr, W crystals and their surface melting temperature have been evaluated. The paper highlights the relation between physical-chemical properties of crystallographically different metals surfaces of the cubic crystal system and the surface arrangement of atoms in the first coordination spheres.

Keywords: anisotropy; surface energy; electron work function; surface melting; model of coordination melting; first coordination sphere of atoms.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лидерами микроэлектронной промышленности освоено производство изделий с проектными нормами 16–14 нм, осваивается технология уровня 10–7 нм, разрабатываются соответствующие новым потребностям материалы и оборудование, накапливаются экспериментальные результаты. Однако переход технологии в нанобласть сопряжен не только с техническими трудностями. Он является качественно новым переходом технологии на работу с материалами, имеющими размерную зависимость свойств. При этом определяющая роль в изменении свойств материалов принадлежит поверхностной энергии кристалла. В настоящее время большие надежды возлагаются на применение новых материалов в монокристаллическом состоянии, что при наноразмерных функциональных элементах требует разработки новых технологий их получения и дополнительных исследований анизотропии их поверхностных свойств, которая зависит от симметрии кристаллической структуры и величин удельной поверхностной энергии кристалла. В работе [1] были исследована анизотропия производительности двухполюсных MOSFET-транзисторов с германиевым каналом. Было показано, что лучший по величине баллистический ток получается на подложке с ориентацией (110) при ориентации каналов в направлении [110]. То есть анизотропия

поверхностных свойств при наноразмерах играет определяющую роль в формировании рабочих характеристик нанотранзисторов. Данный вывод был подтвержден на примерах применения для изготовления каналов нанотранзисторов таких материалов, как GaAs, InAs и др. [2]. Было показано, что лучший баллистический ток через каналы на GaAs, InAs и InSb в nDGfETs также получен на поверхности (110) для каналов, расположенных в направлении [110], что открывает новые возможности в оптимизации параметров квазибаллистических устройств с альтернативными материалами каналов.

Однако до настоящего времени учет анизотропии поверхностных свойств при разработке полупроводниковых устройств не проводится из-за отсутствия полного понимания роли поверхностной энергии и сложностей в ее измерении. Исключением является давно изученная и широко применяемая в технологии жидкостного травления кремния анизотропия скорости травления, а также процессы роста вискерсов на поверхности монокристаллов, хотя и в этих случаях механизмы роста вискерсов и травления монокристаллов кремния не находят однозначной связи с поверхностной энергией. Противоречивы и сведения по анизотропии поверхностной энергии, полученные по разным теоретическим моделям.



МОДЕЛЬ КООРДИНАЦИОННОГО ПЛАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Нами была разработана модель координационного плавления кристаллов (МКП), которая позволила связать анизотропию поверхностных свойств кристалла с его кристаллической структурой и рассчитать значения поверхностной энергии большинства металлов [3]:

$$\sigma_{hkl} = (L_{hkl} \cdot \rho / M) \int_0^{T_m} C_p dT. \quad (1)$$

В соответствии с МКП для всех кристаллов с ГЦК-структурой величина поверхностной энергии убывает в ряду поверхностей $\sigma_{(111)} > \sigma_{(100)} > \sigma_{(110)}$, а для кристаллов веществ с ОЦК-структурой — в ряду $\sigma_{(110)} > \sigma_{(100)} > \sigma_{(111)}$. Основываясь на данных выводах, можно предсказывать анизотропию поверхностных свойств применяемых в технологии микроэлектроники и в химической промышленности кристаллических веществ.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПО МКП С ПОВЕРХНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Так, авторы работы [4], исследовавшие адсорбционные и электрокаталитические свойства различных граней монокристалла родия на примере реакций выделения водорода в катодном процессе и кислорода в анодном процессе, обнаружили, что скорости обеих реакций заметно уменьшаются в ряду поверхностей (111) > поликристалл > (100) > (110). Ниже мы приведем объяснение такому поведению поверхностей родия. Так как Rh имеет ГЦК-структуру, то в соответствии с МКП его поверхностная энергия убывает в ряду $\sigma_{(111)} > \sigma_{(100)} > \sigma_{(110)}$. Таким образом, оказывается, что каталитическая активность родия пропорциональна величине его поверхностной энергии и анизотропия его каталитической активности однозначно связана с анизотропией поверхностной энергии, которая, в свою очередь, зависит от симметрии кристаллической структуры.

Различие в поверхностных свойствах разных поверхностей кристаллических веществ можно объяснить различием электронных свойств находящихся на поверхности атомов, входящих в первые координационные сферы. Последнее становится понятным при рассмотрении координационного окружения поверхностных атомов, находящихся на кристаллографически разных поверхностях кристалла, а также при рассмотрении изменения среднего координационного числа атомов в решетках дефектных кристаллов по мере роста их поверхности [5]. Так как изменение координационных чисел атомов в решетках кристаллических веществ сопровождается изменением электронной структуры кристалла, то оно с неизбежностью отражается на каталитических свойствах этих веществ. На связь электронных свойств полупроводников с ближайшим окружением атомов в кристалле еще в 1947 году указал

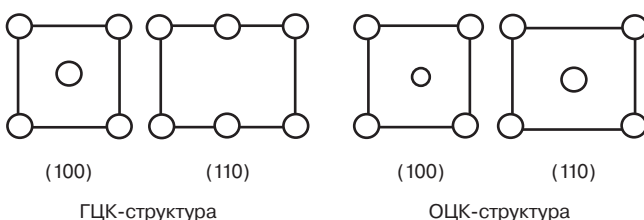


Рис. 1. Расположение на поверхностях (100) и (110) атомов из координационных многогранников в ГЦК- и ОЦК-структурах

академик А. Ф. Иоффе [6]. В работах А. Ф. Регеля и В. М. Глазова [7], изучавших свойства расплавов металлов и полупроводников, было показано, что плавление большинства металлов не сопровождается изменением симметрии первой координационной сферы атомов и поэтому не приводит к резкому изменению электропроводности. Следует учитывать, что координационные многогранники, характеризующие первое координационное окружение атомов в кристаллической структуре, имеют разное расположение поверхностных атомов на кристаллографически разных поверхностях. Рассмотрим поверхности (100) и (110) кубической гранецентрированной структуры (КЧ = 12) и поверхностей (100) и (110) кубической объемно-центрированной структуры (КЧ = 8), в которых кристаллизуется большинство металлов. Как видно из рис. 1, на поверхности находятся атомы, занимающие разные позиции в координационных многогранниках и, значит, имеющие разные электронные свойства. Последнее может объяснять различную каталитическую активность разных монокристаллических поверхностей металлов, а также другие поверхностные свойства металлов, такие как анизотропия работы выхода электрона и анизотропия работы адсорбции.

Влияние поверхностных энергий контактирующих веществ на физико-химические свойства наглядно проявляется в процессах контактного плавления двух монокристаллов. Такие процессы свойственны бинарным системам химических веществ и элементов, способным образовывать между собой эвтектику [8, 9].

При изучении контактного плавления кристаллов разных веществ наблюдается анизотропия температуры контактного плавления кристаллов. Причем данное явление неоднократно наблюдалось ранее, но трактовалось иначе. Так, в работе Савинцева [9] было показано, что плавление монокристалла цинка, обернутого фольгой из эвтектического сплава кадмий — свинец, происходит только по базисным граням цинка. При этом с началом контактного плавления вся фольга постепенно перемещается на базисную грань цинка. По модели координационного плавления кристалла такое поведение можно объяснить максимальным уменьшением поверхностной энергии данной системы при плавлении фольги на базисной грани цинка, т. к. по МКП именно грань (0001) монокристалла цинка, имеющего ГПУ-структуру, обладает максимальным значением поверхностной энергии.

Контактное плавление в микроэлектронике наглядно проявляется в явлении пурпурной чумы, когда при разогреве контакта золотого проводника с алюминиевой разводкой до температуры 350 °С происходит разрушение контакта из-за образования эвтектического сплава AuAl₂.

Подобным явлением можно объяснить и электромиграцию в системе Si — Al, приводящую к разрушению алюминиевых дорожек, нанесенных на поверхность кремниевой пластины, при плотности тока более 105 ампер/см², т. к. при разогреве до температуры 570 °С происходит контактное плавление данной системы с образованием эвтектики в системе Si — Al.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НА СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ

К настоящему времени наиболее подробно изучено влияние поверхностной энергии на свойства нанокристаллов, в которых количество поверхностных атомов сопоставимо с количеством объемных. Учитывая вклад поверхностной энергии в химический потенциал нанокристалла, вывели формулы,



связывающие свойства нанокристаллов с их линейными размерами. Так, согласно уравнению Гиббса — Томсона нанокристалл плавится при более низкой температуре, чем макрокристалл [10]:

$$T(R) = T(\infty) - 2\sigma T(\infty)/\Delta H_m \rho R. \quad (2)$$

С использованием энергетического критерия аморфизации кристаллического вещества нами была выведена формула (3) для расчета предельного размера вещества, находящегося в кристаллическом состоянии при температуре T [11]:

$$L = V \cdot \left(\sum_{i=1}^6 \sigma_{hkl} \right) / \int_T^{T_m} C_p dT, \quad (3)$$

где c_p — теплоемкость, а T_m — температура плавления данного кристаллического вещества вне зависимости от того, каким образом данная величина достигается.

Основываясь на этом критерии, рассчитали предельные размеры нанокристаллов неорганических веществ и металлов при произвольной температуре $T < T_m$, начиная с которых происходит аморфизация кристалла, а также снижение температуры плавления нанокристаллов в зависимости от их размера [11]. Следует отметить, что в выведенной нами формуле (2) фигурируют не поверхностная энергия границы раздела кристалл — расплав и не скрытая теплота плавления кристалла ΔH_m , отвечающая за структурную перестройку кристалла в жидкость, а поверхностная энергия кристалла и его энтальпия при температуре плавления H , т. е. запасенная кристаллом к моменту плавления тепловая энергия. Понятно, что именно эти величины инициируют начало фазового превращения кристалла в жидкость.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НА СВОЙСТВА МАКРОКРИСТАЛЛОВ

Если влияние поверхности на свойства нанокристаллов наглядно проявляется как в экспериментах, так и в термодинамических расчетах, то влияние поверхности на свойства макрокристаллов требует пояснений. Действительно, для макрокристалла многие из вышеприведенных эффектов становятся незначительными уже при микронных размерах кристалла. Однако можно показать, что при любых размерах кристалла его поверхность оказывает определяющее влияние на такие свойства, как работа выхода электрона, каталитическая активность, адсорбционная способность, механическая прочность и плавление кристалла. Каталитическим и адсорбционным свойствам поверхности, также как и механическим свойствам кристаллов,

из-за их практической важности посвящена обширная научная и техническая литература, и их связь с энергетическим и физическим состоянием поверхности не нуждается в пояснениях. В то же время влияние поверхности на плавление кристалла не столь очевидно.

Поверхностные свойства кристаллов имеют определяющее значение в технологии микроэлектроники и наноматериалов. Однако до настоящего времени не установлено однозначной связи между кристаллической структурой веществ и анизотропией физико-химических свойств их поверхности. Имеющиеся многочисленные экспериментальные данные и теоретические расчеты хотя и указывают на такую связь, но зачастую противоречат друг другу. Поэтому важной задачей является установление взаимосвязи между поверхностными свойствами кристаллов и их кристаллической структурой.

АНИЗОТРОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ С АНИЗОТРОПИЕЙ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

Рассмотрим связь анизотропии поверхностной энергии с анизотропией работы выхода электрона на примере разработанной модели координационного плавления кристалла. Работа выхода электронов из разных граней кристаллов определяет эмиссионные свойства данного материала, а также влияет на активность металлических катализаторов. Поэтому данному вопросу посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ.

Применим модель координационного плавления кристалла для оценки анизотропии работы выхода электрона из разных граней кристалла.

Рассчитаем анизотропию удельных поверхностных энергий металлов по МПК и сопоставим ее с известными из литературы экспериментальными и расчетными значениями анизотропии работы выхода электрона из тех же граней монокристаллов металлов.

Для уточнения связи между величинами поверхностной энергии кристалла и работы выхода электрона из разных граней введем понятие гомологического ряда металлов по аналогии с гомологическими рядами органических соединений. Отнесем к гомологам металлы, входящие в одну и ту же группу и подгруппу таблицы Менделеева. Рассмотрим экспериментальные значения поверхностных энергий и работ выхода электронов для нескольких гомологических рядов [12]. При этом напомним, что экспериментально измеренные величины

Таблица 1. Сопоставление экспериментальных значений поверхностных энергий — σ , мДж/м², и работ выхода электронов — Φ , эВ, в гомологических рядах металлов

Металлы группы IA			Металлы группы IIA			Металлы группы VIB			Металлы группы VB		
Me	σ , мДж/м ²	Φ , эВ	Me	σ , мДж/м ²	Φ , эВ	Me	σ	Φ	Me	σ , мДж/м ²	Φ , эВ
Li	525	2,9	Be	2700	4,98	Cr	2300	4,5	V	2550	4,3
Na	260	2,75	Mg	760	3,66	Mo	3000	4,95	Nb	2700	4,87
K	130	2,30	Ca	490	2,87	W	3680	5,25	Ta	3150	4,80
Rb	110	2,16	Sr	410	2,59						
Cs	95	2,14	Ba	370	2,7						



поверхностных энергий металлов измеряются с точностью, не превышающей 10 %, поэтому для их оценки, как правило, применяют различные теоретические модели. Металлы, относящиеся к одному гомологическому ряду, обладают закономерным изменением своих физических и химических свойств. В табл. 1 приведены экспериментально измеренные величины работы выхода и поверхностной энергии металлов, образующих несколько гомологических рядов [12].

Из таблицы видно, что в рядах гомологов максимальной величине поверхностной энергии металлов соответствует максимальная величина работы выхода электрона. Таким образом, работа выхода электрона оказывается пропорциональной величине поверхностной энергии металла. Так как монокристаллы металлов обладают различной поверхностной энергией на кристаллографически разных гранях, то в соответствии с полученными экспериментальными зависимостями максимальное значение поверхностной энергии должно соответствовать поверхностям с максимальным значением работы выхода электрона.

Так как монокристаллы металлов обладают различной поверхностной энергией на кристаллографически разных гранях, то в соответствии с полученными экспериментальными зависимостями и модельными расчетами максимальное значение поверхностной энергии должно соответствовать максимальному значению работы выхода электрона.

В табл. 2 сопоставлены рассчитанные по разным теоретическим моделям [13, 14] и полученные экспериментально величины [15] анизотропии работы выхода металлов с рассчитанными нами по МКП значениями анизотропии поверхностной энергии.

Как видно из таблицы, максимальным значениям поверхностных энергий, рассчитанным по МКП, соответствуют максимальные значения работы выхода электрона на тех же поверхностях кристалла. Кроме того, анизотропия каталитической активности разных поверхностей родия полностью соответствует анизотропии его поверхностных энергий, рассчитанных по МКП: $\sigma_{111} > \sigma_{100} > \sigma_{110}$.

Подобная зависимость характерна и для анизотропии коэффициента адгезии на разных поверхностях монокристалла.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ НА АНИЗОТРОПИЮ РАБОТЫ АДГЕЗИИ НА РАЗНЫХ ГРЯНЯХ КРИСТАЛЛА

Проблема адгезии пленок относится к ключевым проблемам в технологии микро- и нанoeлектроники, а также в технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Использование оптимальных по своим электрическим или механическим свойствам материалов часто становится проблематичным из-за плохой адгезии пленок этих материалов к подслою и разницы в коэффициентах термического расширения (к.т.р.) данного материала и подложки, что приводит к расслоению рабочих структур либо разрыву проводящих дорожек и нарушает работу устройств. Для увеличения адгезионной способности наносимой пленки к данной подложке используют физическое либо химическое модифицирование поверхности подложки или введение промежуточного слоя, обладающего хорошей адгезией как к подложке, так и к наносимой пленке. Так, адгезионная способность гидрофобного материала к гидрофильной поверхности будет крайне низкой, и для ее увеличения необходимо модифицирование поверхности подложки путем нанесения промежуточного слоя, обладающего высокой адгезией как к подложке, так и наносимому материалу. Но и сама величина адгезии пленки одного

Таблица 2. Сопоставление рассчитанных и экспериментальных величин анизотропии работы выхода металлов с рассчитанными нами по МКП значениями анизотропии поверхностной энергии

Me	hkl	σ , мДж/м ² по МКП [12]	Φ , эВ [13]	Φ , эВ [14]	Φ , эВ [15]
Li	100	304	2,61	3,30	2,9
	110	430	2,75	3,55	
	111	180	2,58	3,25	
Na	100	189	2,40	2,75	2,75
	110	267	2,52	3,10	
	111	109	2,39	2,65	
K	100	124	2,25	2,40	2,30
	110	175,3	2,35	2,75	
	111	71,6	2,24	2,35	
Cs	100	85	2,14	2,30	2,14
	110	120	2,23	2,60	
	111	49	2,14	2,20	
Al	100	921	3,92	4,20	4,41
	110	651	3,73	3,65	4,06
	111	1063	4,12	4,05	4,24
Cu	100	1686	4,99	3,80	4,59
	110	1192	4,65	3,55	4,48
	111	1947	5,32	3,90	4,98
Ag	100	1246	4,45	3,55	4,64
	110	881	4,17	3,35	4,52
	111	1439	4,74	3,70	4,74
Au	100	1360	4,99	3,65	5,47
	110	962	4,65	3,50	5,37
	111	1571	5,32	3,80	5,31
Nb	100	1871	4,07		4,02
	110	2646	4,75		4,87
	111	1080	3,94		4,36
Mo	100	2306	4,44		4,53
	110	3261	5,24		4,95
	111	1331	4,27		4,55
W	100	3020	4,66		4,63
	110	4270	5,52		5,25
	111	1743	4,47		4,47
Rh	100	2560			
	110	1810			
	111	2957			

и того же материала к подложке не является постоянной, а зависит от кристаллографической ориентации поверхности. Наиболее ярко это проявляется у монокристаллических материалов, что объясняется анизотропией поверхностной энергии монокристаллов и различием в химическом составе поверхностного слоя атомов в случае химических соединений. В простейшем случае связь между работой адгезии и поверхностными энергиями контактирующих материалов задается уравнением Дюпре :

$$W_a = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_{12}, \quad (4)$$

где W_a — работа адгезии, σ_1 и σ_2 — поверхностные энергии контактирующих фаз, а σ_{12} — межфазная поверхностная энергия границы раздела. Из уравнения Дюпре следует, что максимальной работой адгезии обладает двухфазная система, в которой поверхностные энергии контактирующих фаз максимальны. Поэтому при отсутствии химического взаимодействия максимальной работой адгезии должны обладать границы раздела двух фаз, образованные кристаллографическими плоскостями с максимальными значениями поверхностных энергий.

В работе [16] была экспериментально исследована зависимость степени адгезии поликристаллических пленок никеля, имеющих разную текстуру, к кремниевой подложке с ориентацией поверхности (111). Было найдено, что максимальной адгезией пленок никеля к кремниевой подложке (111) обладают пленки Ni с наибольшей степенью кристалличности и ориентацией текстуры (111).

Расчеты поверхностной энергии монокристаллического никеля, проведенные по формуле (1), показывают, что грани {111} никеля, имеющего кубическую гранецентрированную структуру, обладают максимальным значением поверхностной энергии [12]; максимальным значением поверхностной энергии обладают и грани {111} кремния [12]. Очевидно, что интерфейс Ni/Si должен обладать максимальной адгезией при максимальных значениях поверхностных энергий контактирующихся поверхностей, что и наблюдалось экспериментально в работе [16].

Данный вывод подтверждается и экспериментальной работой японских исследователей, установивших, что коэффициент прилипания атомов Ga и Sb к поверхности монокристаллического кремния, ориентированного по кристаллографическим плоскостям (100) и (111), максимален к поверхности кремния с ориентацией (111) [17]. Но поверхность (111) кремния, по расчетам с применением модели координационного плавления кристалла, обладает максимальным значением поверхностной энергии [12]. Поэтому и коэффициент прилипания атомов галлия и сурьмы к этой поверхности должен быть максимальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, учет анизотропии поверхностной энергии позволяет предвидеть анизотропию других физико-химических свойств поверхности монокристаллических веществ, таких как анизотропия каталитической активности, работы выхода электрона и работы адгезии.

С использованием модели координационного плавления кристалла на примере кристаллов элементарных веществ с примитивной, объемно-центрированной и гранецентрированной кубическими структурами проведены расчеты анизотропии поверхностных свойств, в том числе анизотропии удельной поверхностной энергии и работы выхода. Показано, что анизотропия поверхностных свойств зависит от симметрии

кристаллической решетки и изменяется при переходе вещества в другую кристаллическую модификацию. Таким образом, зная структурный тип кристаллического вещества, можно заранее предсказать анизотропию его поверхностных свойств на поверхностях с разными индексами Миллера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Low T., Hou Y. T., Li M. F., Zhu C., Chin A., Samudra G., Chan L., Kwong D. L. *Investigation of Performance Limits of Germanium Double-Gated MOSFETs* // International Electron Device Meeting 2003. Tech. Dig. P. 961–964.
2. Rafhay Q., Clerc R., Bescond M., Ferrier M., Ghibaudo G. *Impact of Channel Orientation on Ballistic Current of nDGFETs with Alternative Channel Materials* // Solid-State Electronics. 2008. V. 52. № 4. P. 540–547.
3. Bokarev V. P., Krasnikov G. Ya. *Model of coordination melting of crystals and anisotropy of physical and chemical properties of the surface* // Surface Science. 2018. V. 668. P. 73–79.
4. Мерецкий А. М., Кудряшов И. В., Белик В. В., Савицкий Е. М., Полякова В. П., Горина Н. Б. Влияние кристаллографической ориентации на адсорбционные и электрокаталитические свойства Rh // Монокристаллы тугоплавких и редких металлов, сплавов и соединений. — М.: Наука, 1977. — С. 119–124.
5. Бокарев В. П. Геометрическая оценка координационных чисел атомов в дефектных кристаллах неорганических веществ // Известия АН СССР. Неорганические материалы, 1986. — Т. 22. — № 2. — С. 347–348.
6. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. — М.-Л.: Издательство АН СССР, 1957. — 491 с.
7. Регель А. Р., Глазов В. М. Физические свойства электронных расплавов. — М.: Наука, 1980. — 296 с.
8. Флавицкий Ф. М. Исследования эвтектического сплава азотнокислых солей серебра и аммония по методу плавления // ЖРХО, 1909. — Т. 41. — С. 739–740.
9. Савинцев П. А., Калачникова Л. Я. Об анизотропии при контактном плавлении веществ, образующих тройную эвтектику // Изв. Томского политехнического института, 1951. — Т. 68. — Вып. 1. — С. 195–196.
10. Лодиз Р., Паркер Р. Рост кристаллов. — М.: Мир, 1974. — С. 403.
11. Бацанов С. С., Бокарев В. П. О пределе дробления кристаллов неорганических веществ // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1980. — Т. 16. — № 9. — С. 1650–1652.
12. Бокарев В. П. Поверхность и физико-химические свойства кристаллов. — М.: МФТИ, 2018. — 146 с.
13. Steiner D., Gyftopoulos E. P. *An Equation for the Prediction of Bare Work Functions* // In Proc. 27th Conf. on Phys. Electronics, Cambridge, Mass. 1967. P. 160–168.
14. Lang N. D., Kohn W. *Theory of Metal Surfaces: Charge Density and Surface Energy* // Physical Review B. 1970. V. 1. № 2. P. 4555–4568.
15. Michaelson H. B. *The work function of the elements and its periodicity* // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. P. 4729–4733.
16. Наумов В. В., Бочкарев В. Ф., Бучин Э. Ю. Увеличение адгезии металлических пленок к кремнию с помощью ионной бомбардировки в процессе их роста // Журнал технической физики, 2009. — Т. 79. — Вып. 7. — С. 146–149.
17. Matsuo Naoto, Hirofuji Yuichi // Extend. XVIII Intern. Conf. Solid State Devices and Mater., 20–22 Aug. Tokyo, 1986. P. 41–44.