

in Calculated High-Temperature EXAFS Spectra," *J. de Physique IV France* **1997**, 7, C2 279-280. (h) Hung, N. V.; Rehr, J. J. "Anharmonic correlated Einstein-model Debye-Waller factors," *Phys. Rev. B* **1997**, 56, 43-46. (i) Pirog, I. V.; Nedosekina, I. I.; Zarubin, I. A.; Shuvaev, A. T. "Anharmonic pair potential study in face-centred-cubic structure metals," *J. Phys.: Condens. Mat.* **2002**, 14, 1825-1832. (j) Hung, N. V.; Duc, N. B.; Frahm, R. "A New Anharmonic Factor and EXAFS Including Anharmonic Contributions," *J. Phys. Soc. Jpn.* **2003**, 72, 1254-1259. (k) Hung, N. V.; Trung, N. B.; Kirchner, B. "Anharmonic correlated Debye model Debye-Waller factors," *Physica B* **2010**, 405, 2519-2525. (l) Hung, N. V.; Thang, C. S.; Toan, N. C.; Hieu, H. K. "Temperature dependence of Debye-Waller factors of semiconductors," *Vacuum* **2014**, 101, 63-66. (m) Hung, N. V. "Pressure-Dependent Anharmonic Correlated Einstein Model Extended X-ray Absorption Fine Structure Debye-Waller Factors," *J. Phys. Soc. Jpn.* **2014**, 83, 024802:1-6. (n) Hung, N. V.; Tien, T. S.; Duc, N. B.; Vuong, D. Q. "High-Order Expanded XAFS Debye-Waller Factors of HCP Crystals Based on Classical Anharmonic Correlated Einstein Model," *Mod. Phys. Lett. B* **2014**, 28, 1450174:1-10. (o) Hung, N. V.; Hue1, T. T.; Duc, N. B. "Calculation of Morse Potential Parameters of bcc Crystals and Application to Anharmonic Interatomic Effective Potential, Local Force Constant," *YNU J. Sci.: Math. Phys.* **2015**, 31, 23-30.

ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТЕПЛОЁМКОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СПЛАВА АК1М2 НА ОСНОВЕ ОСОБОЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

С.Э. Отаджонов

«Худжандский государственный университет им. Б. Гафурова», г. Худжанд, Таджикистан

Аннотация: известно, что особочистый алюминий с минимальным содержанием примесей широко используется в электронной технике для изготовления токопроводящих дорожек интегральных микросхем. Отсюда разработка новых составов сплавов на основе такого металла является весьма актуальной задачей. Одним из перспективных сплавов на основе такого металла является сплав АК1М2 (Al+1%Si+2%Cu). Данный сплав был принят нами в качестве модельного сплава и подвергался модифицированию щелочноземельными металлами.

Теплоёмкость является важнейшей характеристикой веществ и по её изменению от температуры можно определить тип фазового превращения, температуру Дебая, энергию образования вакансий, коэффициент электронной теплоёмкости и др. свойства. В настоящей работе теплоёмкость сплава АК1М2 с щелочноземельными металлами определялась в режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из меди. Для чего обработкой кривых скорости охлаждения образцов из сплава АК1М2 с щелочноземельными металлами и эталона получены полиномы описывающие их скорости охлаждения. Далее, по экспериментально найденным величинам скоростей охлаждения эталона и образцов из сплавов, зная их массы, были установлены полиномы температурной зависимости теплоёмкости сплавов и эталона, которые описываются четырёхчленным уравнением. Используя интегралы от удельной теплоёмкости были установлены модели температурной зависимости изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса.

Полученные зависимости показывают, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. При этом добавки ЦЗМ не значительно уменьшают теплоёмкость, энтальпию и энтропию исходного сплава АК1М2 и увеличивают величину энергии Гиббса. При переходе от сплавов с кальцием к сплавам с барием величина теплоёмкости уменьшается, что коррелирует с теплоёмкостью чистых ЦЗМ в пределах подгруппы.

Ключевые слова: сплав АК1М2, кальций, стронций, барий, теплоёмкость, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

Введение. В отечественной и зарубежной практике для создания тонких металлических плёнок при разработке интегральных микросхем наметился поворот от использования индивидуальных металлических материалов к высококочистым сплавам, содержащим два или более легирующих компонента. Такой поворот весьма естественен, либо при использовании в качестве проводникового материала чистых металлов возможен целый ряд технологических и эксплуатационных отклонений, устранить которые можно, используя процесс микролегирования. Однако на пути использования микролегирующих добавок возникает ряд проблем, незнание и пренебрежение которыми может привести к отрицательным результатам. К числу таких проблем, прежде всего, относятся:

- выбор вида и оптимального состава добавок;
- примесная чистота легирующих компонентов, которая на сегодняшний день трудно разрешима;
- наличие стабильной технологии и надежной аппаратуры для получения высококочистых сплавов и отсутствие в достаточной степени разработанной теоретической базы для выбора нужных композиций.

Сплавы на основе алюминия, познание их природы и знание их структуры и свойств позволяют резко изменить в лучшую сторону служебные характеристики приборов, а также служат источником для расширения сферы применения высококочистого алюминия в других областях науки и техники, а порой раскрывают у них новые свойства. В этом плане работа, связанная с использованием новых высококочистых алюминиевых сплавов, является актуальной и своевременной [1-3].

К сожалению, на сегодняшний день остались незаслуженно обойденными вниманием исследователей вопросы разработки теоретических основ для выбора нужных композиций сплавов, к числу которых относятся исследования физико-химических свойств сплавов на основе особо чистого алюминия. К числу таких сплавов можно отнести алюминий-кремниевый сплав АК1 и сплав с медью АК1М2 (Al+1%Si+2%Cu) с участием щелочноземельных металлов (ЦЗМ) [4].

В связи с этим исследование температурной зависимости теплоёмкости и изменение термодинамических функций сплава марки АК1М2 с ЦЗМ представляет определённый научный и практический интерес.

Теория метода и описание установки. Для измерения удельной теплоёмкости сплавов в широкой области температур используется закон охлаждения Ньютона – Рихмана. Если взять два одинаковой формы металлических образца и охладить их от одной температуры, то по

Тенденции развития физики конденсированных сред

Секция «Физика конденсированных сред»

зависимости температуры образцов от времени (кривым охлаждения) можно найти теплоёмкость одного образца, зная теплоёмкость другого (эталона).

Количества тепла, теряемого объёмом dV металла за время dt , равно

$$\delta Q = C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{dt} \cdot dV \cdot dt, \quad (1)$$

где C_p^0 - удельная теплоёмкость металла,

ρ - плотность металла,

T - температура образца (принимается одинаковым по всей поверхности образца, так как линейные размеры тела малы, а теплопроводность металла велика).

Величину δQ можно подсчитать кроме того по закону:

$$\delta Q = a(T - T_0) \cdot dS \cdot dt, \quad (2)$$

где dS - элемент поверхности,

T_0 - температура окружающей среды,

a - коэффициент теплоотдачи.

Приравняв выражения (1) и (2), получим

$$C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{dt} \cdot dV = a(T - T_0) dS. \quad (3)$$

Количество тепла, которое теряет весь объём образца равно

$$Q = \int_V C_p^0 \cdot \rho \frac{dT}{dt} \cdot dV = \int_S a(T - T_0) dS. \quad (4)$$

Полагая, что C_p^0 , ρ и $\frac{dT}{dt}$ не зависят от координат точек объема, а a , T и T_0 не зависят от координат точек поверхности образца, можно написать:

$$C_p^0 \cdot \rho \cdot V \frac{dT}{dt} = a(T - T_0) S, \quad (5)$$

или

$$C_p^0 \cdot m \frac{dT}{dt} = a(T - T_0) S, \quad (6)$$

где V - объём всего образца, а $\rho \cdot V = m$ - масса, S - площадь поверхности всего образца.

Соотношение (6) для двух образцов одинакового размера при допущении, что $S_1 = S_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$ пишется так:

$$C_p^0 = C_p^0 \frac{m_1}{m_2} \frac{\left(\frac{dT}{dt}\right)_1}{\left(\frac{dT}{dt}\right)_2}, \quad (7)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ - масса первого образца;

$m_2 = \rho_2 V_2$ - масса второго образца;

$\left(\frac{dT}{dt}\right)_1$, $\left(\frac{dT}{dt}\right)_2$ - скорости охлаждения эталона и образца при данной температуре.

Тенденции развития физики конденсированных сред

Секция «Физика конденсированных сред»

На практике находится средняя скорость охлаждения $\frac{\Delta T}{\Delta \tau}$, где $\Delta T \approx 20\text{K}$, $\Delta \tau$ - промежуток времени, соответствующий ΔT .

Целью данной работы является определение температурной зависимости удельной теплоёмкости сплава АК1М2 по известной удельной теплоёмкости эталонного образца из меди марки М00.

Для определения скорости охлаждения строят кривые охлаждения исследуемых образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе.

Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому - процесс, стремящийся к установлению термодинамического равновесия в системе, состоящей из огромного числа частиц, то есть это релаксационный процесс, который можно описать во времени экспонентой. В нашем случае нагретое тело передает свое тепло окружающей среде (т.е. телу с бесконечно большой теплоёмкостью). Поэтому температуру окружающей среды можно считать постоянной (T_0). Тогда закон изменения температуры тела от времени τ можно записать в виде $\Delta T = \Delta T_1 e^{-\tau/\tau_1}$, где ΔT - разность температур нагретого тела и окружающей среды; ΔT_1 - разность температур нагретого тела и окружающей среды при $\tau = 0$; τ_1 - постоянная охлаждения, численно равная времени, в течение которого разность температур между нагретым телом и окружающей средой уменьшается в e раз.

Подробная методика исследования теплоемкости твёрдых тел в режиме «охлаждения» приведена в работах [5-18]. Схема установки для измерения теплоемкости твердых тел представлено на рис. 1, включающие узлы: электропечь (3) смонтирована на стойке (6), по которой она может перемещаться вверх и вниз. Образец (4) и эталон (5) (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары (4 и 5). Концы термопар подведены к цифровым термометром «Digital Multimeter D19208L» (7, 8 и 9). Электропечь (3) запускается через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (1), установив нужную температуру с помощью терморегулятора (2). По показаниям цифровых термометров «DigitalMultimeterD19208L» (7, 8 и 9), фиксируется значение начальной температуры. Выдвигаем образец (4) и эталон (5) в электропечь (3) и нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter D19208L» на компьютере (10). Образец (4) и эталон (5) одновременно выдвигаем из электропечи (3) и с этого момента фиксируем температуру. Записываем показания цифрового термометра «Digital Multimeter D19208L» (7, 8 и 9) на компьютер (10) через каждый (5, 10, 20с), до охлаждения температуры образца и эталона ниже 35°C .

Результаты и их обсуждение. Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из сплава АК1М2 с ЦЗМ представлены на рисунке 2. Временной интервал фиксации температуры составлял 10 секунд. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40°C до 400°C составляла $\pm 1\%$, а в интервале более 400°C $\pm 2,5\%$. Погрешность измерение теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4%.

Тенденции развития физики конденсированных сред

Секция «Физика конденсированных сред»

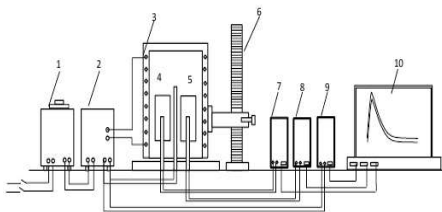


Рис.1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»: 1 - автотрансформатор; 2 - терморегулятор; 3 - электропечь; 4 - образец измеряемый; 5 – эталон, 6 - стойка электропечи; 7 - цифровой термометр измеряемого образца; 8 - цифровой термометр общего назначения; 9 - цифровой термометр эталона; 10 - регистрационный прибор (Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 877, приоритет изобретения от 20.04.2017).

Полученные кривые охлаждения сплавов (рисунок 2) описываются уравнением вида:

$$T = -a \exp(-bt) - p \exp(kt), \quad (8)$$

где a, b, p, k - постоянные для данного образца, t – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (8) по t , получаем уравнение для определения скорости охлаждения сплавов.

$$\frac{dT}{dt} = -abe^{-bt} - pke^{-kt}. \quad (9)$$

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (9) для исследованных сплавов приведены в таблице 1.

Вся обработка результатов производилась по программе MS Excel, и графики строились с помощью программы Sigma Plot. Коэффициент корреляции составил не менее 0,998. Далее по рассчитанным значениям величин скорости охлаждения сплавов по уравнению (9) была вычислена удельная теплоёмкость сплавов с ЦЗМ. При этом использовалась программа Sigma Plot.

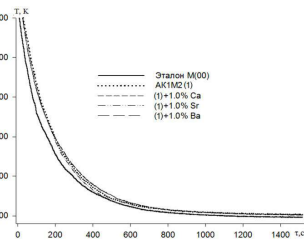


Рис. 2. График зависимости температуры образца от времени охлаждения для сплава АК1М2 с ЦЗМ

Тенденции развития физики конденсированных сред

Секция «Физика конденсированных сред»

Таблица 1

Содержание ЦЗМ в сплаве АК1М2, мас.%	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab, K \cdot c^{-1}$	$pk, K \cdot c^{-1}$
Сплав АК1М2 (1)	569,65	5,74	317,71	3,29	3,27	0,011
(1)+1.0% Ca	544,94	5,56	320,93	3,99	3,03	0,013
(1)+1.0% Sr	569,75	5,73	311,07	3,31	3,26	0,010
(1)+1.0% Ba	567,66	5,76	310,04	1,68	3,27	0,0053
Эталон (Cu марки М00)	481,72	6,49	329,53	8,17	3,13	0,027

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнение (9) для сплава АК1М2 с ЦЗМ

Получены следующие полиномы описывающие температурную зависимость удельной теплоемкости сплава АК1М2 с ЦЗМ:

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (10)$$

Значение коэффициентов уравнения (10) приставлены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание ЦЗМ в сплаве АК1М2, мас.%	a	b	c	d	Коефф. регрессии R, %
Сплав АК1М2 (1)	293,75	2,84	2,88	1,25	0,9991
(1)+1.0%Ca	82,80	3,39	2,71	0,83	0,9989
(1)+1.0% Sr	322,31	2,61	2,59	1,12	0,9995
(1)+1.0%Ba	418,09	1,84	1,58	6,29	0,9998
Эталон (Cu марки М00)	324,454	0,2751	0,28	0,142	1,00

Значения коэффициентов a, b, c, d для эталона и сплава АК1М2 с ЦЗМ

Результаты расчёта удельной теплоёмкости сплавов по формулам (7) и (10) через 100 К представлены в таблице 3.

Таблица 3

Содержание ЦЗМ в сплаве АК1М2	Температура, К						Рост C_p^0 , %
	300	400	500	600	700	800	
АК1М2 (1)	919,9	1048,5	1149,4	1230,3	1298,6	1361,8	32,5
(1)+1.0% Ca	877,6	1057,3	1202,6	1318,7	1410,4	1482,7	40,8
(1)+1.0% Sr	902,4	1023,4	1119,4	1197,2	1263,3	1324,5	31,8

Тенденции развития физики конденсированных сред

Секция «Физика конденсированных сред»

(1)+ 1.0%Ba	844,9	941,6	1021,9	1089,4	1148,0	1201,4	29,6
C _p ⁰ Дж/кг·К	*Ca	647,4	670,4	710,8	-	-	-
	*Sr	305,7	313,6	327,1	-	-	-
	*Ba	206,1	258,7	284,5	-	-	-
Эталон (Cu марки M00)	384,99	397,66	408,00	416,87	425,10	433,56	11,2

*Данные заимствованы из справочника [19]

Для расчета температурной зависимости изменение энтальпии, энтропии и энергии Гиббса были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (10):

$$H^0(T) - H^0(T_0) = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (11)$$

$$S^0(T) - S^0(T_0) = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (12)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)]. \quad (13)$$

где T₀ = 298,12.

Результаты расчета температурных зависимостей изменений энтальпии (кДж/кг) и энтропии (кДж/кг К) для сплава АК1М2 с ЦЗМ представлены на рисунках 3, 4. В таблице 4 приведена температурная зависимость изменение энергии Гиббса для сплава АК1М2 с ЦЗМ.

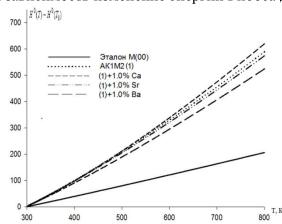


Рис. 3. Температурная зависимость изменение энтальпия для сплава АК1М2 с ЦЗМ

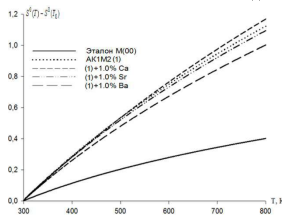


Рис. 4. Температурная зависимость изменение энтропия для сплава АК1М2 с ЦЗМ

Таблица 4

Содержание ЦЗМ в сплаве АК1М2, мас. %	Температура, К					
	300	400	500	600	700	800

Тенденции развития физики конденсированных сред

Секция «Физика конденсированных сред»

AK1M2 (1)	-0,005	-15,1	-56,5	-120,9	-205,9	-309,5
(1)+1.0%Ca	-0,005	-14,7	-55,8	-121,0	-208,3	-315,6
(1)+1.0%Sr	-0,005	-14,8	-55,2	-118,1	-201,1	-302,1
(1)+1.0%Ba	-0,005	-13,8	-51,1	-109,1	-185,2	-277,7
Эталон (Cu марки M00)	-0,002	-6,11	-22,24	-46,58	-77,90	-115,31

Температурная зависимость изменение энергии Гиббса для сплава АК1М2 с ЦЗМ и эталона (Cu марки M00)

Все изменения термодинамических функций и теплоемкости сплава АК1М2 с ЦЗМ объясняются ростом степени гетерогенности структуры сплавов, что связано с модифицированием их структуры при микролегировании ЦЗМ [20, 21].

Заключение

Таким образом, в режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из меди установлено влияние ЦЗМ (Ca, Sr, Ba) на температурную зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК1М2. Показано, что с ростом температуры независимо из концентрации ЦЗМ в сплаве АК1М2 теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. Добавки ЦЗМ до 1.0 мас. % в сплав АК1М2, увеличивают теплоемкость, энтальпию и энтропию и уменьшают значение энергии Гиббса. Теплоемкость сплава АК1М2 с ЦЗМ при переходе от сплавов с кальцием к сплавам с барием уменьшается, что коррелирует с теплоемкостью чистых ЦЗМ (табл. 3). Таким же образом, изменяются термодинамические функции сплава АК1М2 в пределах подгруппы ЦЗМ.

Список литературы

- Белешкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение). Под ред. И.Н. Фридляндера. Справочник. К.: КОМИТЕХ. 2005. 365 с.
- Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1973. 639 с.
- Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарск. гос. техн. ун-т. 2013. 81 с.
- Низёв Х.Х., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э. Сплавы особо чистого алюминия с редкоземельными металлами. Душанбе, ООО «Сармат-Компания». 2017. 146 с.
- Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Иброхимов Н.Ф. Влияние лития на теплоемкость и изменение термодинамических функций алюминиевого сплава АЖ2.18 // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 1. С. 37-44.
- Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И. Влияние иттрия на теплофизические свойства сплава АМг2 // Научный вестник НГТУ. 2017. № 2 (67). С. 177-187.
- Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э., Иброхимов Н.Ф. Температурная зависимость и термодинамических функций сплава АК1М2, модифицированного стронцием // Известия СПбГТИ (ТУ). 2017. № 41 (67). С. 22-26.
- Ганиев И.Н., Низёв Х.Х., Гулов Б.Н., Низомов З., Бердиев А.Э. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом // Вестник СибГИУ. 2017. № 3 (21). С. 32-39.

Тенденции развития физики конденсированных сред

Секция «Физика конденсированных сред»

9. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Аминбекова М.С. Температурная зависимость теплоёмкости и изменение термодинамических функции сплавов системы Pb-Ba // Вестник СПбГТИД. 2018. № 2. С. 69-75.
10. Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Низомов З., Ганиева Н.И., Иброхимов С.Ж. Влияние церия на теплофизические свойства сплава AMr2 // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 1. С. 53.
11. Гулов С.С., Ганиев И.Н., Сафаров М.М., Ганиева Н.И. Влияние добавок германия и олова на теплопроводность сплава АК7М2 в зависимости от температуры // Доклады АН РТ. 2016. Т. 59. № 3-4. С. 142-145.
12. Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Кобулиев З.В., Ганиев И.Н. Влияние лантана, празеодима и неодима на теплофизические свойства сплава AMr4 // Вестник ТТУ. 2016. Т. 3. № 3. С. 33-36.
13. Ганиев И.Н., Якубов У.Ш., Сангов М.М., Сафаров А.Г. Влияния кальция на температурную зависимость удельной теплоёмкости и изменение термодинамических функции алюминиевого сплава АЖ5К10 // Вестник Казанского технологического университета. 2018. Т.21. №8. С. 11-15
14. Ганиев И.Н., Муллоева Н.М., Низомов З., Махмадуллоев Х.А. Теплофизические свойства и термодинамические функции сплавов системы Pb-Sr // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 6. С. 38-42.
15. Ганиев И.Н., Алиев Д.Н., Иброхимов Н.Ф., Алиханова С.Д., Одинаева Н.Б. Температурная зависимость термодинамических функций сплавов Zn5Al и Zn55Al // Доклады АН РТ. 2014. Т. 57. № 7. С. 588-593.
16. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Ибрахимов Н.Ф., Бердиев А.Э. Температурная зависимость теплоёмкости и коэффициента теплоотдачи сплава АК12М2 // Вестник ТУТ. 2014. № 1 (22). С. 22-24.
17. Низомов З., Гулов Б., Ганиев И.Н., Саидов Р.Х., Бердиев А.Э. Температурная зависимость теплоёмкости сплава АКLM2, легированного редкоземельными металлами // Доклады АН РТ. 2011. Т. 54. № 11. С. 917-921.
18. Умаров М.А., Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоёмкости и изменение термодинамических функций свинца марки С2 / М.А. Умаров, И.Н. Ганиев // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 1. С. 23-29.
19. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах // Справ. изд., М.: Металлургия. 1989. 384 с.
20. Вахобов А.В., Ганиев И.Н. Стронций-эффективный модификатор силуминов // Литейное производство. 2000. №5. С.28.
21. Каргаполова Т.Б., Махмадуллоев Х.А., Ганиев И.Н., Хакдодов М.М. Барий-новый модификатор силуминов // Литейное производство. 2001. №10. С.6-9.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Исмаилов К.А.

Каракалпакский госуниверситет им.Бердаха

Полупроводниковая электроника – исключительно прогрессирующая область науки и