УДК 54.058

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ГАЛЛИЯ ПИРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРИ ЕГО КРИСТАЛЛИЗАЦИОННОЙ ОЧИСТКЕ

© 2022 г. В. Б. Кольцов<sup>1,</sup> \*, Н. В. Березина<sup>1</sup>, М. С. Михайлова<sup>1</sup>, С. А. Слесарев<sup>1</sup>, С. В. Ефимов<sup>1</sup>, А. Д. Кирьянова<sup>1</sup>, М. А. Чудакова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", пл. Шокина, 1, стр. 2, Зеленоград, Москва, 124498 Россия \*e-mail: koltsov\_v\_b@mail.ru Поступила в редакцию 27.04.2021 г. После доработки 24.08.2022 г. Принята к публикации 25.08.2022 г.

Рассмотрены особенности получения Ga высокой чистоты из отходов электротехнической и электронной промышленностей. В приближении идеального раствора дана термодинамическая оценка понижения температуры плавления Ga, содержащего примеси. Предложено в ходе процесса финишной кристаллизационной очистки осуществлять контроль чистоты материала путем прецизионного измерения температуры расплава пирометрическим методом.

**Ключевые слова:** галлий, технология производства, особо чистые вещества, технология очистки, отходы электронной промышленности

DOI: 10.31857/S0002337X22100098

## введение

Свыше 70% научных и технических публикаций в области полупроводников и полупроводниковых приборов посвящено исследованию соединений типа  $A^{III}B^{V}$  и  $A^{II}B^{VI}$  [1–4]. Основной задачей материаловедения является получение новых материалов с заданными свойствами, а также ресурсосбережение, т.е. возвращение отходов в цикл производства [5].

Получение галлия из отходов алюминиевой промышленности в настоящее время используется на крупных производствах, предлагающих партии материала от 500 кг. Качество такого материала обычно составляет 99.99%, что соответствует марке технического галлия Гл-0. Однако для полупроводниковой промышленности необходим Ga марок 5N и 6N, что требует специальных, высокотехнологичных методов очистки. Галлий чистоты 5N и 6N получают либо из технического галлия марок Гл-0 и Гл-1, либо извлечением его из отходов электронной и электротехнической промышленностей. В настоящее время в электронной промышленности произошел массовый переход на МОС-гидридные технологии роста эпитаксиальных структур, называемого жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ), особенностью которых является большой расход металла-растворителя, галлия, который в ходе технологического процесса загрязняется твердыми питателями, легирующими компонентами и их производными. Стоимость очистки использованного галлия в 5–10 раз меньше, чем стоимость первичного материала. Суммарная месячная потребность в галлии для ЖФЭ на всех существующих в России производствах составляет порядка 100-150 кг, и 50 кг необходимо для получения других галлийсодержаших материалов. Для производства указанного количества галлия переработкой отходов необходимо учитывать, что на каждом производстве этот металл имеет свой набор загрязнений, который даже в рамках одного предприятия может существенно меняться. Поэтому основной задачей является создание универсального технологического процесса, который позволил бы проводить единый цикл очистки.

Впервые полупромышленная технология очистки галлийсодержащих отходов была описана в работе [6]. Данная технология включает следующие операции: очистка галлия физическим (фильтрационным) методом; гидрохимическая очистка для удаления из галлия более электроотрицательных примесей; кристаллизационная очистка для удаления примесей, имеющих меньшую растворимость в твердом галлии, чем в жидком; электролитическое рафинирование для отделения более электроположительных, чем галлий, примесей; а также вакуум-термическая очистка. Применение всего комплекса методов очистки галлия позволяет получать материал уровня 6N и выше.

Целью работы является модернизация процесса получения особо чистого галлия путем расширения спектра исходных материалов, включающих отходы электронной и электротехнической промышленностей, а также повышение его экономической эффективности.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В процессе создания технологического участка переработки галлийсодержащих отходов нами была разработана схема получения галлия высокой чистоты, которая приведена на рис. 1 [7].

Здесь исходными материалами являются отходы ЖФЭ, лангаситы ( $La_3Ga_5SiO_{14}$ ) и технический галлий как побочный продукт переработки бокситов. До этапа фильтрации каждый вид отходов имеет свой технологический маршрут подготовки. После фильтрации расплав поступает на кристаллизационную очистку для получения особо чистого галлия. Если кристаллизация происходит из расплава, то, как известно, соотношение компонентов в жидкой и равновесной с расплавом твердой фазах можно характеризовать коэффициентом распределения

$$K_0 = C_{\rm TB} / C_{\rm w},\tag{1}$$

где  $C_{\rm TB}$ ,  $C_{\rm w}$  — концентрация примеси в твердой и жидкой фазах соответственно.

Этот коэффициент определяет поведение примеси при проведении самого процесса кристаллизации и характер ее распределения в выращенном кристалле. Величина  $K_0$  зависит от ряда факторов: природы примеси и основного вещества, условий кристаллизации, ее скорости, интенсивности перемешивания расплава, но в первую очередь определяется типом фазовой диаграммы.

Рассмотрим диаграмму состояния двухкомпонентной системы с полной взаимной растворимостью при малых концентрациях второго компонента, приведенную на рис. 2.

Если примесь (В) понижает температуру плавления основного вещества, то это означает, что она будет растворяться в расплаве лучше, чем в твердой фазе, т.е.  $C_{\rm TB} < C_{\rm ж}$ , и тогда  $K_0 < 1$ . Следовательно, кристаллизующаяся фаза будет чище расплава. Из рис. 2 следует, что коэффициент распределения можно рассчитать по отрезкам горизонтальных линий от оси температур до их пересечения соответственно с линиями солидуса и ликвидуса. При малых концентрациях (до 1 ат. %) для описания состояния системы используют законы разбавленных растворов, считая, что кривые солидуса и ликвидуса близки к линейным. Однако если угол между этими кривыми мал, то тогда величины  $C_{\rm TB}$  и  $C_{*}$  близки между собой и  $K_0 \approx 1$ . Это возможно при большом сходстве природы, размеров атомов и характера химической связи основного вещества и примеси. Коэффициент распределения можно определить из химических потенциалов примеси в твердой фазе  $\mu_1$  и жидкой фазе  $\mu_2$  [8], т.е.

$$K_0 = \alpha_1 / \alpha_2 = \exp(\mu_1 - \mu_2) / RT$$
, (2)

где  $\alpha_1, \alpha_2, \mu_1, \mu_2$  – активности и химические потенциалы примеси в твердой и жидкой фазах соответственно, *R* – универсальная газовая постоянная, а Т – термодинамическая температура. Из соотношения (2) следует, что если  $K_0 \approx 1(\mu_1 \approx \mu_2)$ , то очистка твердой фазы происходить не будет. Поэтому необходимо знать значения коэффициентов распределения примесей. Определить равновесный коэффициент распределения из соответствующих диаграмм состояния практически невозможно, поскольку линии ликвидуса и солидуса в области малых концентраций либо очень близки, либо неизвестны или известны приблизительно, и оценка коэффициента  $K_0$  будет приближенной. Кроме того, коэффициент распределения – понятие термодинамическое и, следовательно, применимо только к равновесным процессам. А равновесная кристаллизация, как известно, протекает бесконечно большое время, проходя с бесконечно малой скоростью. Поэтому при проведении процесса кристаллизации коэффициент распределения определяют экспериментально и, имея дело с конечной скоростью процесса, вводят понятие эффективного коэффициента распределения, отличного от равновесного. Такое различие между эффективным и равновесным коэффициентами возникает еще и оттого, что если скорость кристаллизации конечна (состояние системы неравновесное), то движущийся фронт при условии  $K_0 < 1$  будет оттеснять примесь в расплав быстрее, чем она успеет диффундировать в глубь расплава. Поэтому перед фронтом кристаллизации (поверхность раздела расплав/ кристалл) возникает обогащенный примесью слой, называемый диффузионным слоем [9]. Этот слой имеет определенную толщину δ (рис. 3), величина которой находится в пределах 0.001-0.01 см и уменьшается с увеличением перемешивания расплава. Повышение концентрации примеси в расплаве на фронте кристаллизации в свою очередь приводит к ее возраста-

нию и в твердой фазе, т.е.  $C_{TB}^* > C_{TB}$ . Очевидно,

что  $C_{\text{тв}}^* - C_{\text{тв}} \neq C_{\text{ж}}^* - C_{\text{ж}}$  и поэтому  $K_0 \neq K_{\text{р}}$ .

Экспериментально определяемый коэффициент распределения является эффективным, а количественная связь между этими величинами определяется соотношением



Рис. 1. Технологическая схема получения высокочистого галлия.



Рис. 2. Диаграмма состояния эвтектического типа.

$$K_{3\phi} = K_0 / [K_0 + (1 - K_0) \exp(-v\delta/D)], \qquad (3)$$

где v — скорость перемещения фронта кристаллизации, D — коэффициент диффузии примеси в жидкой фазе,  $\delta$  — толщина диффузионного слоя. Величина  $v\delta/D$  называется приведенной скоростью, от нее зависит значение  $K_{3\phi}$ . Расчет равновесного коэффициента распределения проводился по методике, изложенной в работе [10]. В табл. 1 приведены рассчитанные нами равновесные коэффициенты распределения  $K_0$  для примесей в галлии, удаляемых кристаллизационной очисткой.

Из табл. 1 видно, что Ca, Al, Mg, Ti кристаллизационной очисткой убрать из Ga невозможно, да и Ge удалить затруднительно, т. к. требуется многократная кристаллизация. Здесь нет сведений о  $K_0$  для Gd и Te, но из диаграмм фазовых равновесий [11] видно, что для этих примесей в Ga также  $K_0 < 1$ . Рассчитанные нами значения равновесного коэффициента распределения  $K_0$  хорошо согласуются с результатами работы [12]. Вещества, указанные в табл.1, согласно экспериментальным результатам [11], образуют с галлием системы с эвтектикой, которые могут быть описаны с помо-



**Рис. 3.** Распределение примесей у фронта кристаллизации при финишной кристаллизационной очистке  $K_0 < 1$ : а – скорость кристаллизации пренебрежимо мала, б – скорость кристаллизации конечна.

щью теории растворов. Рассматривая компонент A (Ga) как растворитель, а компонент В как растворяемое вещество, для примесей, представленных в табл. 1, можно констатировать, что кривая ликвидуса является кривой, отображающей понижение температуры плавления (или замерзания) компонента A при добавлении компонента B, что описывается соотношением Вант-Гоффа [8]:

$$\Delta T = T_{\rm A} - T \simeq \frac{RT_{\rm A}^2}{\Delta H_{\rm A}} X_{\rm B},\tag{4}$$

где  $X_{\rm B}$  – мольная доля (атомный процент) компонента B,  $\Delta H_{\rm A}, \Delta S_{\rm A}, T_{\rm A}$  – энтальпия, энтропия и температура плавления компонента A соответственно, R – универсальная газовая постоянная.

Множитель  $\frac{RT_{\rm A}^2}{\Delta H_{\rm A}}$  определяется только свойствами

растворителя и не зависит от свойств растворяемого вещества. Понижение температуры растворителя пропорционально лишь мольной доле растворяемого вещества при образовании им с растворителем

Примесь	$K_0$	Примесь	$K_0$	Примесь	$K_0$
Ag	$2.7 \times 10^{-3}$	Cu	$11 \times 10^{-1}$	Ge	$6.5 \times 10^{-1}$
Sn	$1 \times 10^{-2}$	Zn	$1.35 \times 10^{-1}$	Ca	$9.5 \times 10^{-1}$
Ni	$4.3 \times 10^{-2}$	Pb	$2.6 \times 10^{-1}$	Al	1.0
In	$8 \times 10^{-2}$	Fe	$3.5 \times 10^{-1}$	Mg	1.0
Hg	$1.05 \times 10^{-1}$	Cd	$5.1 \times 10^{-1}$	Ti	1.0

Таблица 1. Равновесные коэффициенты распределения K<sub>0</sub> примесей при кристаллизации галлия

1114

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ том 58 № 10 2022

Чистота	Мольная доля, 10 <sup>-6</sup>	Понижение температуры	Чистота	Мольная доля, 10 <sup>-6</sup>	Понижение температуры	Чистота	Мольная доля, 10 <sup>-6</sup>	Понижение температуры
Ag	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Sn	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Ni	X <sub>B</sub>	$\Delta T$
3N	1546	0.211	3N	1701.472	0.232	3N	841.978	0.115
4N	155	0.021	4N	170.255	0.023	4N	84.1858	0.011
5N	15.5	0.002	5N	17.0266	0.002	5N	8.41846	0.001
6N	1.55	0.0002	6N	1.70267	0.0002	6N	0.841845	0.0001
In	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Hg	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Cu	X <sub>B</sub>	$\Delta T$
3N	1645.8	0.225	3 <i>N</i>	2872	0.392	3N	912	0.124
4N	164.7	0.022	4N	288	0.039	4N	91.1	0.012
5N	16.47	0.002	5 <i>N</i>	28.8	0.003	5N	9.11	0.001
6N	1.647	0.0002	6 <i>N</i>	2.88	0.0003	6N	0.911	0.0001
Zn	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Pb	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Fe	X <sub>B</sub>	$\Delta T$
3N	937.8	0.128	3N	2966.039	0.405	3N	801.149	0.109
4N	93.78	0.013	4N	297.13	0,.041	4N	80.1	0.011
5N	9.78	0.001	5N	29.7183	0.004	5N	8.00991	0.001
6N	0.9378	0.0001	6N	2.97188	0.0004	6N	0.80099	0.0001
Cd	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Ge	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Ca	X <sub>B</sub>	$\Delta T$
3N	1611	0.220	3N	1042	0.142	3N	575.087	0.079
4N	161	0.022	4N	104	0.014	4N	57.4867	0.008
5N	16.1	0.002	5N	10.4	0.001	5N	5.74845	0.0008
6N	1.61	0.0002	6N	1.04	0.0001	6N	57.5	$7.851 \times 10^{-5}$
Al	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Mg	X <sub>B</sub>	$\Delta T$	Ti	X <sub>B</sub>	$\Delta T$
3N	387.2	0.052	3N	348.836	0.048	3N	687	0.094
4N	38.7	0.005	4N	34.8631	0.005	4N	68.7	0.009

3.48611

0.348609

5N

6N

0.0005

 $47.61 \times 10^{-5}$ 

Таблица 2. Мольная доля примесей, удаляемых кристаллизационной очисткой, и величина понижения температуры плавления Ga (°C) в зависимости от степени чистоты

идеальных разбавленных растворов. Величина мольной доли примесного элемента будет равна

0.001

 $5.29 \times 10^{-5}$ 

3.87

0.387

5N

6N

$$x_{\rm B} = v_1/(v_1 + v_2) = (m_1/M_1)/(m_1/M_1 + m_2/M_2),$$
 (5)

где  $v_1$ ,  $v_2$  — количества вещества компонентов A и В соответственно,  $m_1$ ,  $m_2$  — массы растворенного вещества и растворителя, а  $M_1$ ,  $M_2$  — соответственно их молекулярные массы. Для галлия, содержащего примеси, удаляемые кристаллизационной очисткой (табл. 1), по соотношениям (5), (6) были проведены расчеты понижения температуры плавления для чистоты галлия, равной 3N, 4N, 5N и 6N соответственно. Результаты расчетов представлены в табл. 2. В [13] показано, что для разбавленных растворов, доля примеси в которых составляет менее 1 ат. %, взаимодействие между примесными элементами можно не учитывать и совокупно рассматривать примесь как второй элемент. Особенно это справедливо для галлия, температура плавления которого составляет величину 303 К. То-гда уравнения (4), (5) можно записать в виде

5N

6N

$$\Delta T = T_{\rm A} - T \approx R T_{\rm A}^2 X_{\rm np} / \Delta H_{\rm A} \,, \tag{6}$$

6.87

0.687

0.001

 $9.38 \times 10^{-5}$ 

И

$$X_{\rm np} = \frac{\nu_{\rm np}}{\nu_{\rm np} + \nu_{\rm Ga}} = \left(\frac{m_{\rm np}}{M_{\rm np}}\right) / \left(\frac{m_{\rm np}}{M_{\rm np}} + \frac{m_{\rm Ga}}{M_{\rm Ga}}\right), \quad (7)$$

где  $X_{np}$  — мольная доля (ат. %) примеси в основном веществе, в данном случае Ga,  $m_{np}$  — масса примеси в смеси с Ga,  $M_{np}$  — молекулярная масса примеси.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным [11, 14], в галлии обнаружены на сегодняшний день 62 примесных элемента, но только 15 из них понижают температуру плавления последнего, и поэтому эти примеси, как было показано выше, могут быть удалены из Ga кристаллизационной очисткой.

Предположим, что в исходном галлии содержатся различные комбинации всех пятнадцати возможных элементов, поэтому молекулярную массу примеси  $M_{\rm np}$  можно представить как

$$M_{\rm np} = \alpha_1 M_1 + \alpha_2 M_2 + \ldots + \alpha_n M_n, \tag{8}$$

 $M_1...M_n$  — молекулярные массы элементов, входящих в примесь;  $\alpha_1...\alpha_n\%$  — процентное содержание элементов примесного вещества в смеси.

Конечно, в случае различного элементного состава примесей действительное распределение примесных элементов в смеси неизвестно, но в первом приближении его можно принять как равномерное. Если все 15 рассматриваемых элементов присутствуют в равном количестве и распределены равномерно, то  $\alpha_1 \dots \alpha_{15}$  – составляет величину 6.66...67% для каждого. Проведенные оценки показали, что понижение температуры плавления галлия совместно с вышеуказанными элементами при его чистоте 3N составляет величину порядка 0.1000°С, для чистоты 4N - 0.0100°С, для 5N -0.0010°С и для 6N – 0.0001°С, при средней молекулярной массе примесей 87.80 × 10<sup>-3</sup> кг-моль. Нужно отметить, что приведенные оценки хорошо согласуются с данными [15, 16], где в зависимости от чистоты Ga исследовалась его температура плавления.

Прецизионное измерение температуры плавления Ga в вышеуказанных работах проводилось в термических ячейках стандартным платиновым термометром сопротивления при равновесном фазовом переходе. Так, в работе [15] приведены температуры плавления Ga разной чистоты, а именно: 3N, 5N и выше 6N. Они составляют соответственно 29.76, 29.7701-29.7712 и 29.7713-29.7716°С. В работе [16] приведена температура плавления ультрачистого Ga выше 6N (99.999995%), которая составляет 29.7646°С. Ошибка измерения температуры плавления при использовании данного метода составляет порядка (или менее) 10<sup>-4</sup>°C, что позволяет сделать заключение о значимости изменений в четвертом знаке после запятой, вероятно, соответствующих ликвации примесей в образцах. Как видно из [16], увеличение количества примесей в Ga приводит к понижению его температуры плавления. При чистоте Ga порядка 5N ликвации примесей приводят к изменению температуры в третьем знаке после запятой и составляют порядка 10<sup>-3</sup>°C. Понижение температуры плавления Ga при снижении его чистоты до 3N составляет уже порядка 10<sup>-1</sup>-10<sup>-2</sup>°С. Приведенные в [15] и [16] экспериментальные результаты согласуются с термодинамической оценкой значения понижения температуры плавления Ga с учетом второго элемента. Сравнивая проведенные нами оценки понижения

температуры плавления Ga с расчетными результатами (табл. 2), можно сделать вывод, что величина  $\Delta T$  будет увеличиваться с ростом содержания в смеси более тяжелых элементов (Ag, In, Sn, Hg, Pb и т.п.), что, вероятно, является общей термодинамической закономерностью и хорошо сопасуется с нашими экспериментальными данными. В нашем эксперименте процесс кристаллизационной очистки продолжительностью около 20 ч проводился таким образом, чтобы на момент его окончания жидкой фазы оставалось примерно 10—15% от общего объема загрузки. До настоящего времени постепенная очистка контролировалась визуально.

Приведенные выше соображения позволяют предложить метод пирометрического контроля температуры кристалла и расплава в течение всего процесса кристаллизационной очистки. Суть метода заключается в наведении прецизионного пирометра на зеркало расплава вблизи кристалла. Для таких измерений, как показано в работе [17], необходимо применять высокоточный пирометр спектрального диапазона с  $\lambda = 0.3 - 0.5$  мкм с точностью измерения до сотых долей градуса с последующей калибровкой прибора на стандартную эталонную температуру плавления галлия [15, 16]. Согласно стандарту IPTS-68 температура плавления Ga составляет 29.7714  $\pm$  0.0014°C, а по стандарту ITS-90 - 29.7646 ± 0.0046°С. Использование такого пирометра позволяет внести существенные уточнения в вопрос о числе стадий кристаллизационной очистки. В ходе эксперимента, включающего несколько повторений процесса кристаллизации, на первой стадии кристаллизации температура расплава составляла 29.60°С (или 29.3677°С по шкале ITS-90), что свидетельствовало о довольно широком примесном составе данного материала, но после шестой стадии температура составила 29.98°С (или 29.7448°С по шкале ITS-90), что свидетельствует о чистоте материала не менее 5N, согласно ТУ48-4-350-84. В его основе лежат спектральные, полярографические, экстракционноколориметрические и электрические определения содержания примесных элементов в галлии.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные термодинамические расчеты понижения температуры плавления галлия при его финишной кристаллизационной очистке позволяют правильно оценить чистоту получаемого материала при применении экспресс-метода пирометрического контроля его температуры в течение всего процесса кристаллизации. Применяя экспресс-метод пирометрического контроля материала, можно уменьшить количество повторений процесса кристаллизации с 10 до 5–6 раз, т.е. 15–17 кг очищенного сырья получается из 35–40 кг исходного материала уже через 5–6 сут. Такой контроль приводит к уменьшению нагрузки на оборудование и экономии электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Медведева З.С., Калашник О.Н., Калашников Я.А. и др. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. М.: Наука, 1979. 339 с.
- Маренкин С.Ф., Федорченко И.В., Изотов А.Д., Васильев М.Г. Физико-химические основы синтеза магнитогранулированных структур полупроводник-ферромагнетик на примере А<sup>II</sup>GeAs<sub>2</sub>, где А<sup>II</sup> – Zn, Cd // Неорган. материалы. 2019. Т. 55. № 9. С. 920–926. https://doi.org/10.1134/S0002337X19090069
- Novotortsev V.M., Kochura A.V., Marenkin S.F. New Ferromagnetics Based on Manganese-Alloyed Chalcopyrites A<sup>II</sup>B<sup>IV</sup>C<sub>2</sub><sup>V</sup> // Inorg. Mater. 2010. V. 46. № 13. P. 1421–1436. https://doi.org/10.1134/S0020168510130029
- 4. Маренкин С.Ф., Изотов А.Д., Федорченко И.В., Новоторцев В.М. Изготовление магнитных гранулированных структур в системах полупроводникферромагнетик // Журн. неорган. химии. 2015. Т. 60. № 3. С. 295–300. https://doi.org/10.1134/S0036023615030146
- 5. Скобелев Д.О., Шубов Л.Я., Иванков С.И., Доронкина И.Г. Систематизация технологий ресурсосбере-
- на И.1. Систематизация технологии ресурсосоере жения. М.: Сам Полиграфист, 2020. 610 с.
- Потолоков Н.А., Козлов С.А., Захарова Н.С., Федоров В.А. Получение высокочистых галлия и мышьяка из отходов производства полупроводниковых материалов // Тез. докл. XI конф. по химии высокочистых веществ. Нижний Новгород. 2000. С. 35–36.
- 7. Кольцов В.Б., Ларионов Н.М., Слесарев С.А., Баркинхоева Т.А. Разработка технологии получения

галлия полупроводниковой чистоты // Естеств. и техн. науки. 2016. № 4(94). С. 12–20.

- 8. Глазов В.М., Павлова Л.М. Химическая термодинамика и фазовые равновесия. М.: Металлургия, 1988. 560 с.
- 9. *Угай Я.А.* Введение в химию полупроводников. М.: Высш. Школа, 1975. 302 с.
- Маренкин С.Ф., Очертянова Л.И., Бельский Н.К., Харсика В.Ф. Эффективный коэффициент распределения Те в ZnAs<sub>2</sub> // Неорган. материалы. 2000. Т. 36. № 4. С. 411–414.
- Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Справочник / пер. с англ. Новика П.К.; под ред. Новикова И.И. и Рогельберга И.Л. М.: Металлургиздат, 1962. 1488 с.
- 12. Козлов С.А. Получение высокочистого галлия из отходов производства полупроводниковых материалов: дис. ... к. х. н. М.: ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН, 2004. 116 с.
- 13. *Ухов В.Ф., Ватолин Н.А., Гельчинский Б.Р.* Межчастичное взаимодействие в жидких металлах. М.: Наука, 1979. 195 с.
- Девятых Г.Г., Карпов Ю.А., Осипова Л.И. Выставкаколлекция веществ особой чистоты / под ред. Девятых Г.Г. М.: Наука, 2003. 236 с.
- The Gallium Melting-Point Standard / U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards. NBS Special Publication 481. Washington. 1977. 36 p.
- Strouse G.F. Standard Reference Material 1751: Gallium Melting-Point Standard, NIST Special Publication 260-157, Chemical Science and Technology Laboratory Process Measurements Division National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8. Washington. 2004. 20 p.
- 17. *Фрунзе А.В.* Методология повышения точности бесконтактных приборов теплового контроля, веществ, материалов и изделий: автореф. дис. ... д. т. н. Тамбов. 2017. 35 с.