

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.91:621.365

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.009

## ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ФОТОКАТОДА НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $\text{CeIr}_5$

Алексей Гранитович Никифоров<sup>1</sup>, Борис Федорович Демьянов<sup>2†</sup>,  
Данила Алексеевич Никифоров<sup>3</sup>, Алексей Евгеньевич Левичев<sup>4</sup>, Сергей Львович Микерин<sup>5</sup>,  
Андрей Эдуардович Симанчук<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

<sup>3,4</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Россия

<sup>5,6</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, пр. Академика Коптюга, 1, 630090, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> akexnik0113@mail.ru

<sup>2</sup> bfdemyanov@mail.ru<sup>†</sup>

<sup>3</sup> nikdanila@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>

<sup>4</sup> a.levichev@g.nsu.ru

<sup>5</sup> mikerin@iae.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5049-8570>

<sup>6</sup> alex@iae.nsk.su

**Аннотация.** В настоящей работе проведено исследование фазового состава и структуры сплава Ir-16,7 ат. % Ce со стехиометрией  $\text{CeIr}_5$ . Методом рентгенофазового анализа установлено, что сплав не является однофазным, в нем присутствуют в значимых количествах три фазы –  $\text{CeIr}_5$ , Ir и  $\text{Ce}_2\text{Ir}_7$ . Сплав имеет поликристаллическую структуру, зерна состоят из высокодисперсной эвтектической смеси двух фаз  $\text{CeIr}_5$  + Ir. Интерметаллид  $\text{CeIr}_5$  образует матрицу, в которые включены кристаллы Ir. Кристаллы Ir имеют глобулярную и игольчатую форму. Характерный размер глобулярных кристаллов 1-3 мкм, диаметр игольчатых кристаллов 0,5-1,0 мкм. При выходе на поверхность фотокатода иглы Ir образуют столбчатую структуру с радиусом кривизны около 400 нм и плотностью  $\rho = 33 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$ . Дисперсность структуры обеспечивает большую плотность межфазных границ. Оценка показывает, что на поверхности площадью 1  $\text{мм}^2$  длина сети межфазных границ составляет 0,83 м.

**Ключевые слова:** фотокатод, сплав иридий-церий, фаза  $\text{CeIr}_5$ , эвтектика, рентгенофазовый анализ.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

**Для цитирования:** Никифоров А.Г., Демьянов Б.Ф., Никифоров Д.А., Левичев А.Е., Микерин С.Л., Симанчук А.Э. Фазовый состав и структура поверхности фотокатода на основе интерметаллида  $\text{CeIr}_5$  // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 365–371. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.009.

Original article

## PHASE COMPOSITION AND SURFACE STRUCTURE OF A PHOTOCATHODE BASED ON $\text{CeIr}_5$ INTERMETALLIC COMPOUND

Alexey G. Nikiforov<sup>1</sup>, Boris F. Dem'yanov<sup>2†</sup>, Danila A. Nikiforov<sup>3</sup>, Alexey E. Levichev<sup>4</sup>,  
Sergey L. Mikerin<sup>5</sup>, Andrey E. Simanchuk<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup> Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

<sup>3,4</sup> Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Acad. Lavrentieva Pr., 11, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>5,6</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Acad. Koptuyg Pr., 1, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>1</sup> akexnik0113@mail.ru

<sup>2</sup> bfdemyanov@mail.ru<sup>†</sup>

<sup>3</sup> nikdanila@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>

<sup>4</sup> a.levichev@g.nsu.ru

<sup>5</sup> mikerinsl@iae.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5049-8570>

<sup>6</sup> alex@iae.nsk.su

**Abstract.** In this work, we studied the phase composition and structure of an Ir-16.7 at. % Ce alloy with CeIr<sub>5</sub> stoichiometry. Using X-ray phase analysis, it was found that the alloy is not single-phase, it contains three phases in significant amounts – CeIr<sub>5</sub>, Ir and Ce<sub>2</sub>Ir<sub>7</sub>. The alloy has a polycrystalline structure; the grains consist of a highly dispersed eutectic mixture of two CeIr<sub>5</sub> + Ir phases. The CeIr<sub>5</sub> intermetallic compound forms a matrix in which Ir crystals are included. Ir crystals are globular and needle-shaped. The characteristic size of globular crystals is 1-3 μm, the diameter of needle-like crystals is 0.5-1.0 μm. When the needle reaches the surface of the photocathode, Ir form a columnar structure with a radius of curvature of about 400 nm and a density of  $\rho = 33 \cdot 10^4 \text{ mm}^{-2}$ . Dispersion of the structure provides a high density of interphase boundaries. The estimate shows that on a surface with an area of 1 mm<sup>2</sup>, the length of the network of interphase boundaries is 0.83 m.

**Keywords:** photocathode, iridium-cerium alloy, CeIr<sub>5</sub> phase, eutectic, X-ray phase analysis.

**Acknowledgements:** The work was carried out under Agreement No. 075-15-2021-1359 with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and partly with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the state task of the Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. FWUS-2021-0004).

**For citation:** Nikiforov, A. G., Dem'yanov, B. F., Nikiforov, D. A., Levichev, A. E., Mikerin, S. L. & Simanchuk, A. E. (2023). Phase composition and surface structure of a photocathode based on CeIr<sub>5</sub> intermetallic compound. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 365–371. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.009.

## Введение

Выбор материала фотокатода имеет большое значение не только с позиций электронной зонной структуры интерметаллических соединений, но и фазового состава и структуры фотокатода. Система Ce-Ir включает в себя большое количество промежуточных интерметаллических фаз, что позволяет получать не только однофазные, гомогенные материалы, но и многофазные сплавы со сложной дефектной структурой [1-4]. Для понимания и целенаправленного воздействия на эмиссионные свойства необходимо подробное исследование морфологии и размерных характеристик фаз, вида дефектов и характера распределения дефектных областей кристаллической структуры. Целью данной работы является исследование фазового состава и структуры сплава Ir-16,7 ат. % Ce. Режим кристаллизации сплава был выбран таким, чтобы получить высокодисперсную структуру с большой плотностью элементов рельефа с радиусом кривизны около 1 мкм и большой протяженностью межфазных границ.

## Материал и экспериментальные методики

Сплав Ce-83,3 ат. % Ir был получен с помощью электронно-лучевой плавки. Соотношение компонентов в шихте задавалось таким

образом, чтобы сплав имел стехиометрический состав соответствующий интерметаллиду CeIr<sub>5</sub>. Кристаллизация из расплава происходила в процессе охлаждения образца с печью. Процесс превращения, даже при таком относительно медленном охлаждении, являлся неравновесным, скорость охлаждения выбиралась для получения дисперсной фазовой структуры.

Из слитка вырезались катоды в форме цилиндров диаметром 6 мм и высотой 3 мм. Источником фотоэмиссии электронов является поверхность катода, поэтому был сформирован рельеф методом электролитического травления. Режим травления был подобран таким образом, чтобы растворить матрицу эвтектики и получить столбчатые кристаллы Ir с радиусом кривизны менее 1 мкм.

Для установления фазового состава полученные образцы исследовали методом рентгенофазового анализа. Съемку образцов для рентгенофазового анализа проводили на дифрактометре ДРОН-6 (CuK $\alpha$ -излучение,  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ). Угол  $2\theta$  изменяли в диапазоне от 15 до 90° с шагом 0,01°, время экспозиции 10 секунд на точку. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью пакета программ PDWin, предназначенного для автоматизации процесса обработки рентгенограмм. Для идентификации дифракционных максимумов использовалась картотека PDF-2 Международного центра дифракционных данных (ICDD).

### Фазовый состав сплава Ir-16,7 ат. % Се

Система Се-Ir содержит большое количество интерметаллических соединений, поэтому сплавы этих элементов в большинстве случаев являются многофазными со сложной внутренней структурой. На рис.1 приведена диаграмма состояния системы Се-Ir, на которой отмечены области существования всех промежуточных фаз этой системы. Всего система Се-Ir включает в себя девять промежуточных фаз [5, 6]. Большинство соединений кристаллизуются по перитектическим реакциям, только две фазы  $CeIr_2$  и  $CeIr_5$  имеют конгруэнтное превращение, поэтому для получения однофазной структуры необходимо медленное охлаждение расплава.

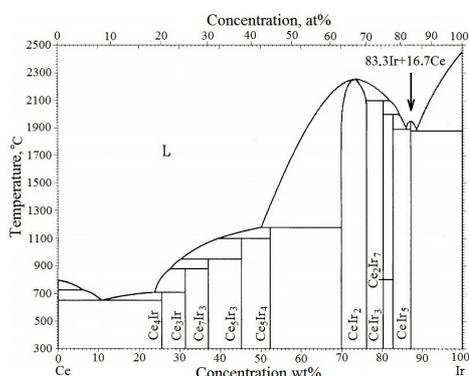


Рис.1. Диаграмма состояния Се-Ir

Fig.1. Ce-Ir state diagram

Можно выделить два концентрационных интервала, существенно отличающихся температурами плавления фаз. В первом интервале содержание Ir изменяется от 0 ат. % до 60 ат. %. В этой концентрационной области

присутствует 5 фаз:  $Ce_4Ir$ ,  $Ce_3Ir$ ,  $Ce_7Ir_3$ ,  $Ce_5Ir_3$  и  $Ce_5Ir_4$ . Самая тугоплавкая фаза из перечисленных  $Ce_5Ir_4$  имеет температуру плавления 1180 °С. Во втором интервале от 60 ат. % до 100 ат. % существует 4 фазы:  $CeIr_2$ ,  $CeIr_3$ ,  $Ce_2Ir_7$  и  $CeIr_5$ . Температура плавления этих фаз существенно выше и достигает 2250 °С для  $CeIr_2$ . Сплав Ir-16,7 ат. % Се, соответствующий соединению  $CeIr_5$ , отмечен на рис.1 стрелкой. Температура плавления чистого Ir составляет 2447 °С. Проведенный анализ показывает, что более устойчивы к повреждениям лазерным облучением и, соответственно более предпочтительны для изготовления фотокатодов являются соединения Се-Ir с содержанием Ir более 60 ат. %. Данные по решеткам компонентов и промежуточных фаз в системе Се-Ir приведены в [7].

Рентгенограмма сплава Ir-16,7 ат. % Се приведена на рис.2. По данным рентгенограммы был определен качественный фазовый состав сплава. Расшифровка рентгенограммы показала, что наиболее сильные линии соответствуют фазам  $CeIr_5$  и твердому раствору на основе Ir. Растворимость Се в решетке Ir практически отсутствует, поэтому твердый раствор является почти чистым Ir. В образце также присутствует фаза  $Ce_2Ir_7$ , имеющая достаточно высокую долю объема в образце. Таким образом, рентгенофазовый анализ показывает, что сплав Ir-16,7 ат. % Се со стехиометрией  $CeIr_5$  не является однофазным, в нем присутствуют в значимых количествах три фазы –  $CeIr_5$ , Ir и  $Ce_2Ir_7$ . Более подробно фазовый анализ сплава приведен в [8].

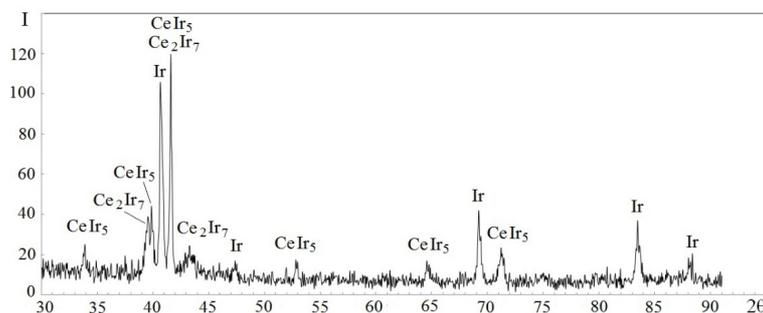


Рис.2. Рентгенограмма сплава Ir-16,7 ат. % Се

Fig.2. X-ray pattern of the Ir-16.7 at. % Ce

Фаза  $CeIr_5$  имеет кубическую сингонию, пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ , структурный тип  $Be_3Au$ . Решетка содержит 34 атома, параметр решетки  $a = 0,751$  нм, координационное число  $z = 4$ . Температура плавления 1880 °С,

кристаллизация фазы происходит конгруэнтно. Фаза  $Ce_2Ir_7$  имеет тригональную сингонию, пространственная группа  $Rm$ , структурный тип  $Gd_2Co_7$ . Параметры решетки  $a = 0,5294$  нм,  $b = 0,5294$  нм,  $c = 3,8938$  нм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,

$\gamma = 120^\circ$ . Решетка содержит 92 атома, имеет большой период вдоль оси  $z$ . Координационное число  $z = 6$ . Фаза существует при концентрации 77,8 ат. % Ir. Температура плавления равна  $1940^\circ\text{C}$ , кристаллизация фазы происходит по перитектическому механизму. Данные по характеристикам фаз взяты из работы [9]

### Микроструктура образца.

Тонкая структура сплава Ir-16,7 ат. % Ce была исследована методом оптической микроскопии. На рис.3 приведена крупномасштабная структура образца. Структура представляет собой вытянутые зерна, которые ориентированы друг относительно друга различным образом. Размеры зерен изменяются в широких пределах: длина достигает 500 мкм, типичный размер составляет 200-250 мкм. Толщина зерен варьирует от 10 до 50 мкм. Исследования при большом увеличении показали, что зерна состоят из высокодисперсной эвтектической смеси двух фаз  $\text{CeIr}_5 + \text{Ir}$ . Наиболее типичные структуры эвтектики показаны на рис.4.

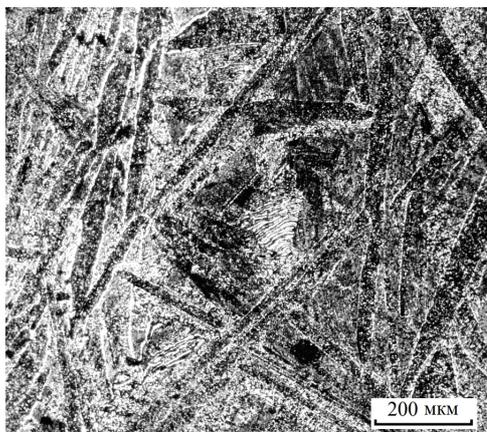


Рис.3. Крупномасштабная структура образца

Fig.3. Large scale sample structure

На рис.4 показаны участки поверхности, включающие несколько зерен. Фаза Ir имеет светлый контраст и включена в темную матрицу  $\text{CeIr}_5$ . Эвтектическая структура возникла при охлаждении сплава, состав которого соответствовал интерметаллическому соединению  $\text{CeIr}_5$ . При достижении температуры близкой к кристаллизации фазы  $\text{CeIr}_5$  из жидкости начала образовываться фаза  $\text{Ce}_2\text{Ir}_7$ , температура кристаллизации которой на  $60^\circ$  выше. Соединение  $\text{Ce}_2\text{Ir}_7$  содержит больше Ce по сравнению с  $\text{CeIr}_5$ , поэтому содержание Ce в жидкой фазе уменьшилось и состав сплава сдвинулся в сторону Ir ближе к эвтектической точке (см. диа-

грамму состояния на рис.1). Основой сплава является фаза  $\text{CeIr}_5$  поэтому, при образовании эвтектики, она является матрицей, в которую включена фаза Ir. Рельеф поверхности создавался электролитическим травлением, при этом химически стойкий Ir не поддается травлению и выглядит как светлые и выступающие над поверхностью столбчатые кристаллы.

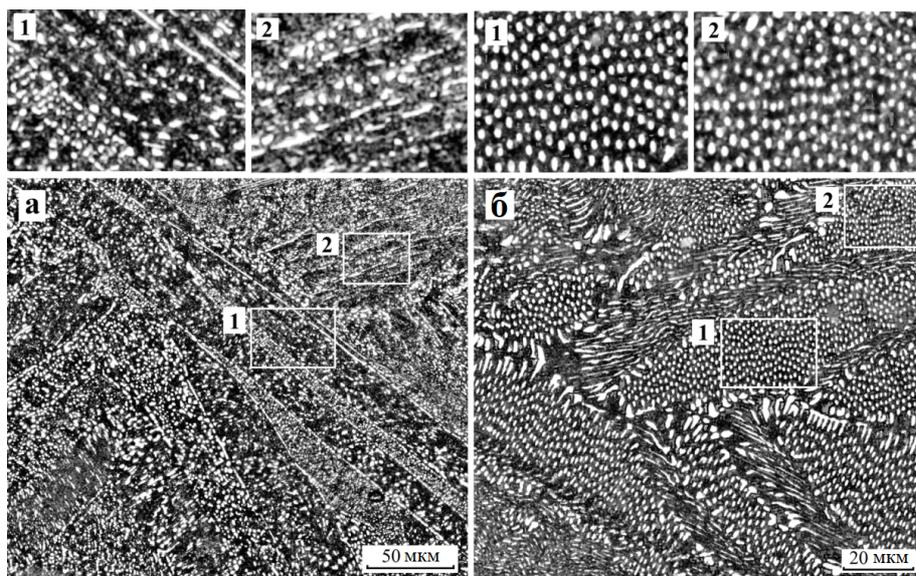
Структура образца мелкодисперсная, размер кристаллов Ir в большинстве случаев менее 1 мкм. Кристаллизация зерен эвтектики проходила в условиях различной степени равновесности (например, различной скорости охлаждения областей материала), поэтому морфология фазы Ir, входящей в эвтектику, отличается в разных зернах образца. Разновидности эвтектики показаны на рис.4. По форме кристаллов фазы Ir можно выделить глобулярную и игольчатую эвтектику. На рис.4а показана область образца с глобулярной эвтектикой. Частицы Ir имеют форму округлых кристаллов, часто вытянутых в одном направлении (область 1 на рис.4а). Размеры и доля частиц Ir в разных зернах отличаются. Характерный размер глобулярных кристаллов 1-3 мкм, вытянутые кристаллы достигают 5 мкм. Во многих зернах частицы имеют форму близкую к сферической с диаметром около 1 мкм. В области 2 на рис.4а показаны глобулярные кристаллы неправильной формы.

Одной из часто встречающихся структур является эвтектика, содержащая кристаллы Ir в виде системы тонких параллельных игл, простирающихся через все зерно от одной границы до другой. На рис.4б показаны зерна эвтектики, в которых игольчатые кристаллы направлены перпендикулярно поверхности образца. Видно, что их сечения круговой формы, диаметры всех кристаллов имеют одинаковые размеры, расположены кристаллы равномерно. Область 1 на рис.4б находится в зерне эвтектики, в котором иглы ориентированы под небольшим углом к поверхности образца, поэтому их сечения имеют вытянутую овальную форму. При измерении размеров необходимо учитывать, что диаметром игл является меньшая ось овала. В области 2 на рис.4б сечения игл близки к круговым.

По данным рентгенофазового анализа в образце присутствует соединение  $\text{Ce}_2\text{Ir}_7$ . Эта фаза, возможно, располагается по границам зерен эвтектики  $\text{CeIr}_5 + \text{Ir}$ . На рис.3 и 4а хорошо видно, что практически все границы зерен окаймлены сплошным слоем фазы, имеющей светлый контраст. Фаза  $\text{CeIr}_5$  содержит 20 ат. % Ce, а фаза  $\text{Ce}_2\text{Ir}_7$  содержит 29 ат. % Ce. Образование фазы

$Ce_2Ir_7$  с большим содержанием Ce на границах зерен связано с различием размеров атомов компонентов, а также с особенностями их электронного строения. Атомные радиусы Ce и Ir составляют 183 пм и 136 пм соответственно. Атом Ce значительно больше атома Ir, размерный фактор составляет 0,35. Ионные радиусы также существенно различаются. Ce имеет ионный радиус 149 пм, Ir – 112 пм, размерный фактор составляет 0,33. Границы зерен харак-

теризуются большим избыточным объемом [10, 11], поэтому на них происходит сегрегация атомов с большим размером [12-14]. Таким образом, слой на границе зерен имеет состав, содержащий повышенное количество Ce по сравнению со средним составом слитка. Фазообразование на границах зерен требует дополнительного изучения. Следует отметить, что фаза  $Ce_2Ir_7$  также является перспективным материалом для фотокатодов [15].



**Рис.4.** Эвтектическая структура зерен. Глобулярная (а) и игольчатая (б) эвтектика. Выделены области 1 и 2, которые показаны с увеличением вверху рисунков

**Fig.4.** Eutectic structure of grains. Globular (a) and acicular (b) eutectic. Areas 1 and 2 are highlighted, which are shown with magnification at the top of the figures

Для определения количественных характеристик структуры была проведена статистическая обработка фазового состава игольчатой эвтектики. Основной объем занимает  $CeIr_5$ , в нем включены вытянутые кристаллы Ir, имеющие форму близкую к цилиндрической. Измерения диаметров кристаллов показали, что их значения имеют небольшой разброс – величины расположены в узком диапазоне от 0,5 мкм до 1,0 мкм. Средний диаметр равен 0,8 мкм. Таким образом, размер кристаллов позволяет получить на поверхности игольчатые элементы Ir с радиусом кривизны около 400 нм. Учитывая, что эмиссионные свойства Ir ниже, чем  $CeIr_5$ , такая кривизна является положительным фактором, повышающим эмиссию фотокатода. По фотографиям микроструктуры проведен подсчет количества игл на известной площади и рассчитана их плотность. Плотность точек выхода Ir на поверхность составляет  $\rho = 33 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$ . Высокая плотность активных точек также дает вклад в эмиссию фотокатода.

Измеренные характеристики фазовой структуры позволяют рассчитать содержание элементов Ir и Ce в данном зерне. Предполагая, что фаза Ir имеет цилиндрическую форму и, используя среднее значение диаметра, можно рассчитать ее объемную долю. Оценка дала следующее значение – объемная доля фазы Ir составляет 12,7 % от всего объема зерна эвтектики. Учитывая атомный состав фаз, получим следующее соотношение элементов в данном зерне эвтектики: 85,4 ат. % Ir + 14,6 ат. % Ce. Таким образом, состав области в зерне образца содержит Ce на 2,1 ат. % меньше по сравнению со средним составом образца. Этот состав хорошо согласуется с эвтектическим составом системы Ir-Ce: 85,2 ат. % Ir + 14,8 ат. % Ce.

Высокодисперсная структура фотокатода дает большую плотность межфазных границ. Межфазные границы, как и границы зерен, являются плоскими дефектами с сильно искаженными межатомными связями. При среднем диаметре выходящей на поверхность образца иглы Ir  $d = 0,8 \text{ мкм}$  и плотности игл  $\rho = 33 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$ , длина сети межфаз-

ных границ на поверхности площадью  $1 \text{ мм}^2$  составляет  $L = 0,83 \text{ м}$ .

### Заключение

Проведенные исследования показали, что при определенных режимах кристаллизации сплава со стехиометрией  $\text{CeIr}_5$  образуется высокодисперсная многофазная структура с размером кристаллов  $0,5\text{-}1,0 \text{ мкм}$ . Основным элементом структуры образца является эвтектика  $\text{CeIr}_5 + \text{Ir}$ . Это связано с тем, что кристаллизация фазы  $\text{Ce}_2\text{Ir}_7$  по границам зерен обедняет церием состав материала внутри зерна и концентрация элементов становится близкой к эвтектическому. Интерметаллид  $\text{CeIr}_5$  образует матрицу, в которые включены кристаллы Ir. Кристаллы Ir в большинстве случаев имеют глобулярную и игольчатую форму.

Определены количественные характеристики поверхностной структуры фотокатода. Малый размер кристаллов позволяет получить на поверхности методом электролитического травления игольчатые элементы Ir с радиусом кривизны около  $400 \text{ нм}$  и плотностью  $\rho = 33 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$ . Наличие развитого рельефа поверхности катода приводит к увеличению фактической площади эмиссии электронов. Кроме того, вершины столбчатого рельефа обладают повышенной эмиссионной активностью и их высокая плотность может оказывать существенное влияние на эмиссионные свойства поверхности. Дисперсность структуры обеспечивает большую плотность межфазных границ. Оценка показывает, что на поверхности площадью  $1 \text{ мм}^2$  длина сети межфазных границ составляет  $0,83 \text{ м}$ . Присутствие межфазных границ, в области которых существенно изменена симметрия решетки, может понизить работу выхода электронов и увеличить квантовую эффективность.

### Список литературы

1. Abada A. et al. FCC-ee: the lepton collider // *Eur. Phys. J. Special Topics*. 2019. V. 228. P. 261–623.
2. Kuznetsov G.I. IrCe cathodes for EBIS // *Journal of Physics: Conference Series*. 2004. V. 2. P. 35–41.
3. Satoh D. et al. Characterization of binary Ce–Ir alloy photocathodes // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2019. V. 58. S1B10.
4. Yoshida M. et al. Generation and acceleration of low-emittance, highcurrent electron beams for SuperKEKB // *Proc. of LINAC*. 2014. P. 21–25.
5. Inorganic material database (AtomWork): [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://crystdb.nims.go.jp/en>. Дата обращения: 18.07.2023.
6. Xu Y., Yamazaki M., Villars P. Inorganic materials database for exploring the nature of material // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2011. V. 50. P. 11RH02.
7. Никифоров А.Г., Демьянов Б.Ф., Старостенков М.Д., Никифоров Д.А., Левичев А.Е., Микерин С.Л., Кучьянов А.С., Логинова М.В., Агейкова Л.Н. Фазовая структура фотокатода Ir-16,7 ат.% Ce // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2021. Т. 18, № 3. P. 311–318.
8. Никифоров А.Г., Демьянов Б.Ф., Никифоров Д.А., Левичев А.Е., Микерин С.Л., Кучьянов А.С., Старостенков М.Д. Особенности структуры поверхности фотокатода CeIr // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2021. Т. 18, № 1. P. 129–134.
9. Okamoto H. The Ce–Ir (cerium-iridium) system // *J. Phase Equilibria*. 1991. V. 12. P. 563–565.
10. Векман А.В., Демьянов Б.Ф. Базовые элементы структуры границ зерен наклона. Часть 2. Оси разориентации [110] и [111] // *Физика твердого тела*. 2020. Т. 63, Вып. 1. P. 55–64.
11. Векман А.В., Драгунов А.С., Демьянов Б.Ф., Адарич Н.В. Энергетический спектр границ зерен наклона в меди // *Изв. вузов. Физика*. 2012. Т. 55, № 7. P. 65–71.
12. Gubbi A.N., George E.P., Ohriner E.K., Zee R.H. Influence of cerium additions on high-temperature-impact ductility and fracture behavior of iridium alloys // *Metall. Mater. Trans. A*. 1997. V. 28. P. 2049–2057.
13. Heatherly L., George E.P. Grain-boundary segregation of impurities in iridium and effects on mechanical properties // *Acta Mater.* 2001. V. 49. P. 289–298.
14. Sekido N., Murakami H., Yamabe-Mitarai Y. Phase equilibria and oxidation behavior of Ir-rich Ir–Y binary alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. V. 476. P. 107–112.
15. Satoh D., Shibuya T., Hayashizaki N., Zhang R., Zhou X., Natsui T., Yoshida M. Research and development of iridium cerium photocathode for SuperKEKB injector linac // *Energy Procedia*. 2017. V. 131. P. 326–333.

### Информация об авторах

А. Г. Никифоров – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Б. Ф. Демьянов – доктор физико-математических наук, профессор Алтайского

государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Д. А. Никифоров – младший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

А. Е. Левичев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

С. Л. Микерин – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией физики лазеров Института автоматики и электрометрии СО РАН.

А. Э. Симанчук – младший научный сотрудник Института автоматики и электрометрии СО РАН.

### References

1. Abada, A. et al. (2019). FCC-ee: the lepton collider. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 228, 261–623.
2. Kuznetsov, G. I. (2004). IrCe cathodes for EBIS. *Journal of Physics: Conference Series*, 2, 35–41.
3. Satoh, D. et al. (2019). Characterization of binary Ce–Ir alloy photocathodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 58, SIIB10.
4. Yoshida, M. et al. (2014). Generation and acceleration of low-emittance, highcurrent electron beams for SuperKEKB. *Proc. of LINAC*, 21–25.
5. Inorganic material database (AtomWork): [Electronic resource] – Access mode <https://crystdb.nims.go.jp/en>. Date of the application: 18.07.2023.
6. Xu, Y., Yamazaki, M. & Villars, P. (2011). Inorganic materials database for exploring the nature of material. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 11RH02.
7. Nikiforov, A. G., Dem'yanov, B. F., Starostenkov, M. D., Nikiforov, D. A., Levichev, A. E., Mikerin, S. L., Kuch'yanov, A. S., Loginova, M. V. & Ageykova, L. N. (2021). Fazovaya struktura fotokatoda Ir-16.7 at. % Ce. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 18(3), 311–318. (In Russ.).
8. Nikiforov, A. G., Dem'yanov, B. F., Nikiforov, D. A., Levichev, A. E., Mikerin, S. L., Kuch'yanov, A. S. & Starostenkov, M. D. (2021). Osobnosti struktury poverkhnosti fotokatoda

CeIr. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 18(1), 129–134. (In Russ.).

9. Okamoto, H. (1991). The Ce–Ir (cerium-iridium) system. *J. Phase Equilibria*, 12, 563–565.

10. Vekman, A. V. & Dem'yanov, B. F. (2020). Bazovyye elementy struktury granits zeren naklona. Chast' 2. Osi razoriyentatsii [110] i [111]. *Fizika tverdogo tela*, 63(1), 55–64. (In Russ.).

11. Vekman, A. V., Dragunov, A. S., Dem'yanov, B. F. & Adarich, N. V. (2012). Energeticheskiy spektr granits zeren naklona v medi. *Izv. vuzov. Fizika*, 55(7), 65–71. (In Russ.).

12. Gubbi, A. N., George, E. P., Ohriner, E. K. & Zee, R. H. (1997). Influence of cerium additions on high-temperature-impact ductility and fracture behavior of iridium alloys. *Metall. Mater. Trans. A*, 28, 2049–2057.

13. Heatherly, L. & George, E. P. (2001). Grain-boundary segregation of impurities in iridium and effects on mechanical properties. *Acta Mater.*, 49, P. 289–298.

14. Sekido, N., Murakami, H. & Yamabe-Mitarai, Y. (2009). Phase equilibria and oxidation behavior of Ir-rich Ir–Y binary alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 476, 107–112.

15. Satoh, D., Shibuya, T., Hayashizaki, N., Zhang, R., Zhou, X., Natsui, T. & Yoshida, M. (2017). Research and development of iridium cerium photocathode for SuperKEKB injector linac. *Energy Procedia*, 131, 326–333.

### Information about the authors

A. G. Nikiforov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

B. F. Demyanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

D. A. Nikiforov – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS.

A. E. Levichev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS.

S. L. Mikerin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Head of the Laser Physics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry SB RAS.

A. E. Simanchuk – Junior Researcher, Institute of Automation and Electrometry SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 17.07.2023.

The article was received by the editorial board on 21 June 23; approved after reviewing 03 July 23; accepted for publication 17 July 23.