

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. SEMICONDUCTORS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 1. С. 17–25.
DOI: 10.17073/1609-3577-2023-1-17-25

УДК 621.315.592

Теллурид кадмия для высокоэффективных солнечных элементов

© 2023 г. И. И. Марончук¹✉, Д. Д. Саникович¹, Е. В. Давыдова¹,
Н. Ю. Табачкова²

¹ ООО «АДВ–Инжиниринг»,
1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: igimar@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы производства порошков теллурида кадмия заданных чистоты и гранулометрического состава, предназначенных для изготовления высокоэффективных солнечных элементов. Получена опытная партия порошков, на основе которых изготовлены и исследованы образцы пленочных солнечных элементов с параметрами на уровне ведущих мировых стандартов. Методом рентгеновской дифрактометрии определен фазовый состав образцов порошков и пленок, методом растровой электронной микроскопии — структурный анализ и измерение элементного состава. Описано влияние наличия фазы свободного теллура в порошках на ресурсные характеристики полученных приборов. Показано, что в пленках избыток теллура, который расположен преимущественно по границам зерен, может приводить со временем к ухудшению электрофизических характеристик солнечных элементов из-за изменения параметров кристаллической структуры фазы теллурида кадмия, вызванного изменением стехиометрического состава. Структурные исследования пленок не выявили в них отличий до и после ресурсных испытаний. Разработана, обоснована и опробована новая технологическая схема получения порошков теллурида кадмия с учетом преимуществ и недостатков используемой ранее технологии, проведены эксперименты, подтверждающие правильность выбранных решений.

Ключевые слова: порошки, теллурид кадмия, тонкие пленки, напыление, солнечный элемент, фазовый состав, элементный состав

Для цитирования: Марончук И.И., Саникович Д.Д., Давыдова Е.В., Табачкова Н.Ю. Теллурид кадмия для высокоэффективных солнечных элементов. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(1): 17–25. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-17-25>

© 2023 National University of Science and Technology MISIS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Cadmium telluride for high–efficiency solar cells

I. I. Maronchuk¹✉, D. D. Sanikovich¹, E. V. Davydova¹, N. Yu. Tabachkova²

¹ *ADV–Engineering, LLC,
3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation*

² *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: igimar@mail.ru*

Abstract. Problems of the synthesis of cadmium telluride powders having required purity and grain size distribution for high–efficiency solar cells have been analyzed. A test batch of powders has been synthesized and used for the manufacture and study of thin–film solar cell specimens exhibiting parameters compliant with the best worldwide standards. The phase composition of the powders has been studied using X–ray diffraction. Structural analysis and elemental composition measurements have been carried out using electron microscopy. The effect of free tellurium phase in the powders on the endurance of devices manufactured from the powder has been described. We show that excess tellurium in the film specimens whose atoms are predominantly localized along grain boundaries may cause temporal degradation of the electrical properties of the manufactured solar cells due to changes in the parameters of the crystalline structure of the cadmium telluride phase which are caused in turn by changes in the stoichiometric composition of the material. Structural studies of the film specimens have not revealed differences in the film structure before and after endurance tests. A new cadmium telluride powder process route has been developed, proven and tested taking into account the advantages and drawbacks of the previously used process and experiments confirming the correctness of the technical solutions chosen have been conducted.

Keywords: powders, cadmium telluride, thin films, sputter deposition, solar cell, phase composition, elemental composition

For citation: Maronchuk I.I., Sanikovich D.D., Davydova E.V., Tabachkova N.Yu. Cadmium telluride for high–efficiency solar cells. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(1): 17–25. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-17-25>

Введение

Известно, что энергетическая отрасль является опорой развития мировой экономики, однако, углеводородные ресурсы, составляющие ее основу, не безграничны, при этом стоимость их добычи, транспортировки и переработки ежегодно увеличивается, усугубляя уже существующие экологические проблемы [1]. Выходом из сложившейся ситуации является разработка, внедрение и развитие перспективных наукоемких технологий энергопреобразования и сбережения, основанных на принципиально новых, высокоэффективных и инновационных технических разработках [2, 3].

К таким перспективным направлениям энергетики можно отнести «солнечную» фотоэнергетику, тенденции развития которой за последние 15 лет значительно превосходят тенденции развития каких–либо других отраслей мировой промышленности [4, 5]. Необходимо отметить, что уже сейчас выработка солнечной энергии составляет более 3 % от всей генерируемой в мире, а ввод но-

вых мощностей солнечных электростанций в 2018 и 2019 гг. составил порядка 113 и 120 ГВт в год соответственно, таким образом превысив 650 ГВт [6]. Однако себестоимость «солнечной» электроэнергии на настоящий момент времени пока довольно высока в сравнении с другими традиционными методами генерации несмотря на ежегодное снижение. В 2018 г. в Европе она составила 69 долл. США/(МВт·ч) при средней стоимости электроэнергии, вырабатываемой на ТЭС и АЭС, ~ 50 долл. США/(МВт·ч) [4]. При этом цена в ряде контрактов на мировом рынке «солнечной» энергетики уже в 2016 г. опускалась ниже 30 долл. США/(МВт·ч), что, по экспертному мнению, связано с рядом территориальных экономических факторов [7].

В настоящее время более 90 % действующих мировых производителей солнечных модулей используют в качестве основного материала кремний [4]. Однако существуют и другие перспективные в данной отрасли материалы, в частности теллурид кадмия (CdTe), эффективность модулей на основе которого обусловлена, прежде всего,

большим значением коэффициента поглощения и оптимальной шириной запрещенной зоны, составляющей 1,5 эВ [8—10]. Необходимо отметить, что большое влияние на электрофизические свойства CdTe и, следовательно, на параметры солнечных элементов (СЭ) оказывают собственные точечные дефекты и даже незначительные отклонения от стехиометрического состава [11—14]. Поэтому инновационные работы в области материаловедения соединения CdTe актуальны. Исследовательские работы в области создания высокоэффективных СЭ на основе тонких пленок CdTe движутся ускоренными темпами, что позволит в ближайшее время сократить затраты на получаемую ими энергию до 60 %, значительно опередив в цене за 1 Вт кремниевые фотоэлектрические преобразователи энергии [2].

Согласно данным Национальной лаборатории по возобновляемой энергетике (NREL, США) за 2022 г., максимально достигнутая эффективность тонкопленочных СЭ на основе CdTe, полученных ведущим мировым производителем подобных модулей — компанией First Solar, составляла 22,1 % [15]. Этой компании принадлежит и предыдущий рекордный показатель в 21,5 % в 2016 г. Директор компании First Solar считает, что целью работы его предприятия является подтверждение постоянного конкурентного преимущества CdTe по сравнению с традиционной технологией кристаллического кремния.

Типичная структура СЭ на основе CdTe показана на рис. 1 [9]. Основными технологиями получения таких СЭ являются процессы сублимации, химического напыления, химического осаждения из газовой фазы, а также эпитаксия и трафаретная печать [16—20].

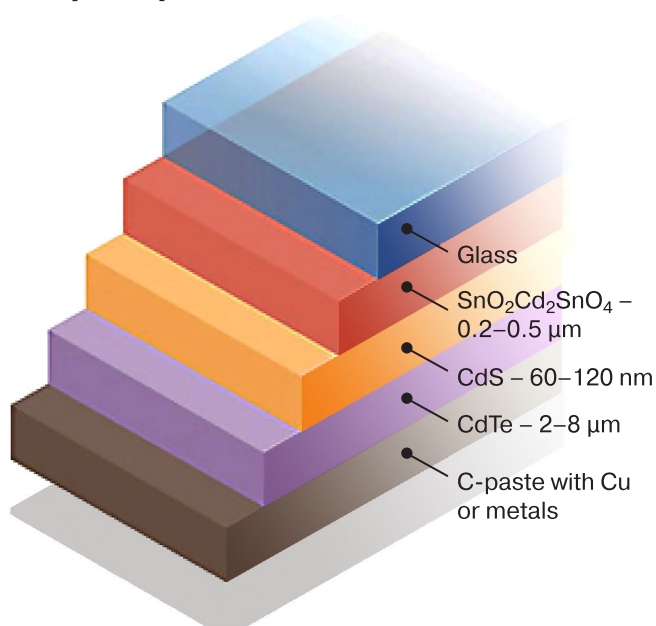


Рис. 1. Типичная структура СЭ на основе CdTe [9]
Fig. 1. Typical CdTe SC structure [9]

С учетом сказанного выше, изучение проблем, связанных с интенсивным развитием солнечной энергетики и со снижением себестоимости получаемой СЭ энергии, носит глобальный характер и является актуальной задачей. Необходимо развивать любые технологические направления, способные повысить эффективность приборов солнечной энергетики с целью улучшения уже имеющихся характеристик, снизив цену за 1 Вт при ее получении.

Целью исследований являлась разработка технологических основ получения порошков CdTe заданных стехиометрического и гранулометрического составов и элементной чистоты для производства высокоэффективных тонкопленочных СЭ, а также исследование их свойств.

Образцы и методы исследования

Опытная партия порошков CdTe произведена ООО «АДВ–Инжиниринг» (АДВ) для изготовления СЭ одним из ведущих немецких производителей высокоэффективных тонкопленочных солнечных модулей из CdTe и поставщиком фотоэлектрических систем под ключ — фирмой Calyxo. Порошки CdTe получены стандартным способом, используемым в АДВ, из исходных компонентов с чистотой не хуже марки 5N, произведенных по уникальной технологии [21—24]. Способ получения порошков основан на процессе прямого синтеза в квазигерметичном кварцевом реакторе и включает в себя переделы, связанные со спеканием, отжигом, измельчением и рассевом синтезированного материала, согласно необходимым заказчику требованиям по чистоте и гранулометрическому составу [25].

На основе опытной партии порошков с использованием различных технологических параметров напыления тонких пленок специалистами фирмы Calyxo были изготовлены опытные СЭ стандартного размера $1200 \times 600 \times 6,9 \text{ мм}^3$ с использованием оригинальной, запатентованной технологии [26]. Исследования электрофизических параметров полученных опытных СЭ показали их соответствие промышленно выпускаемым образцам класса мощности СХЗ [26], а по некоторым показателям даже превысили их. Некоторые электрофизические параметры этих СЭ приведены в табл. 1.

Однако при проведении ресурсных испытаний по методике производителя [26], было выявлено, что деградация опытных СЭ проходит интенсивней, чем в стандартно изготовленных.

С целью выявления причины нестабильности свойств СЭ при ресурсных испытаниях были проведены исследования порошков и пленок на их основе в ЦКП НИТУ МИСИС. Объектами исследований являлись порошки CdTe чистотой

Таблица 1 / Table 1

Сравнение некоторых электрофизических параметров опытных солнечных элементов и солнечных элементов класса CX3 на основе тонких пленок теллурида кадмия

Comparison between some electrical parameters of test solar cells and CX3 Grade cadmium telluride thin-film solar cells

Электрофизический параметр	Солнечный элемент	
	Опытный образец	CX3
Номинальная мощность P_{mpp} , Вт	87,0	85,0
Ток короткого замыкания I_{sc} , А	2,2	2,0
Холостое напряжение V_{os} , В	60,5	62,0

не хуже 5N (99,999 % (мас.) по основному веществу), произведенные в АДВ. В качестве эталонных образцов использовали порошки, применяемые на производстве в фирме Caluxo, с идентичным гранулометрическим составом в диапазоне от 125 до 250 мкм. Кроме того, исследовали структуру поверхности пленок, полученных из этих порошков специалистами фирмы Caluxo при стандартных технологических параметрах изготовления СЭ, до и после ресурсных испытаний.

Исследования фазового состава материалов осуществляли методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре D8 Discover фирмы Bruker AXS. Структурный анализ и исследование элементного состава образцов проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6480LV фирмы JEOL с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии INCA DRY COOL производства компании Oxford instruments.

Результаты и их обсуждение

При исследовании фазового состава и параметров кристаллической структуры образцов выявлено, что в порошке, произведенном АДВ, кроме фазы CdTe, содержится крайне небольшое количество (следы, на уровне предела обнаружения метода) избыточного теллура. Порошок Caluxo и пленки на его основе, по данным рентгеновской дифрактометрии, однофазны, причем параметр кристаллической решетки фазы CdTe в пленке после ресурсных испытаний не изменялся. В пленках, полученных из порошков АДВ, избыточного теллура обнаружено не было, однако, параметр решетки фазы CdTe после ресурсных испытаний изменился, чего не произошло в покрытии из порошков, стандартно применяемых в Caluxo. На наш взгляд, это вызвано наличием избыточного теллура, содержащегося в порошках и присут-

ствующего в пленках в аморфной фазе на границах зерен. Данные по исследованию фазового состава образцов CdTe приведены в табл. 2.

Исследования образцов тонких пленок CdTe, полученных из порошков Caluxo и АДВ, методом растровой электронной микроскопии во вторичных электронах не выявили в них отличий как до, так и после ресурсных испытаний. Покрытия сплошные и однородные, пор и трещин не обнаружено, размеры зерен изменяются в диапазоне от 1 до 5 мкм. Структура и морфология пленок после ресурсных испытаний не менялись.

Элементный состав пленок до и после ресурсных испытаний в различных точках оставался неизменным в пределах погрешности измерений методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Свободный теллур в образцах АДВ идентифицировать не удалось, так как он присутствовал в количестве ниже допустимого предела измерения используемого метода, а также, возможно, из-за его расположения преимущественно по границам зерен.

На рис. 2 приведены примеры изображений морфологии пленок из порошков Caluxo до и после ресурсных испытаний соответственно, полученных на растровом электронном микроскопе.

Для устранения описанных выше недостатков была существенно усовершенствована имеющаяся технология получения порошков CdTe. Разработана, обоснована и опробована новая технологическая схема получения порошков CdTe, основанная на методе прямого синтеза в квазигерметичном кварцевом реакторе (рис. 3) и учитывающая преимущества и недостатки предыдущей технологии. Кроме того, на ряде переделов усовершенствованы технологическая оснастка и параметры проведения процессов.

Условно схему можно разбить на четыре технологических группы.

1. Подготовка основных и вспомогательных материалов, технологической оснастки и оборудования к основным процессам. К этой технологической группе необходимо (можно) отнести следующие процессы:

- химико-механическая подготовка основных материалов, которые используют в процессе синтеза, включающая при необходимости их измельчение путем проведения процессов грануляции исходных материалов;
- химико-механическая подготовка и отжиг кварцевой и графитовой оснастки, используемой в основных технологических переделах;
- измерение температурных полей (профилей) печных блоков технологического оборудования;
- контроль состояния, профилактики и ремонта основного и вспомогательного оборудования.

Таблица 2 / Table 2

Фазовый состав и параметры кристаллической структуры исследуемых образцов теллурида кадмия
Phase composition and lattice parameters of cadmium telluride specimens

Образец	Фазовый состав	Концентрация, % (об.)	Параметры решетки, нм
Порошок Caluxo	CdTe	100	$a = 0,6483$
Порошок АДВ	CdTe Te	96 4	$a = 0,6483$ $a = 0,4457$ $c = 0,5929$
Пленки Caluxo до ресурсных испытаний	CdTe	100	0,6492
Пленки АДВ до ресурсных испытаний	CdTe	100	0,6490
Пленки Caluxo после ресурсных испытаний	CdTe	100	0,6492
Пленки АДВ после ресурсных испытаний	CdTe	100	0,6492

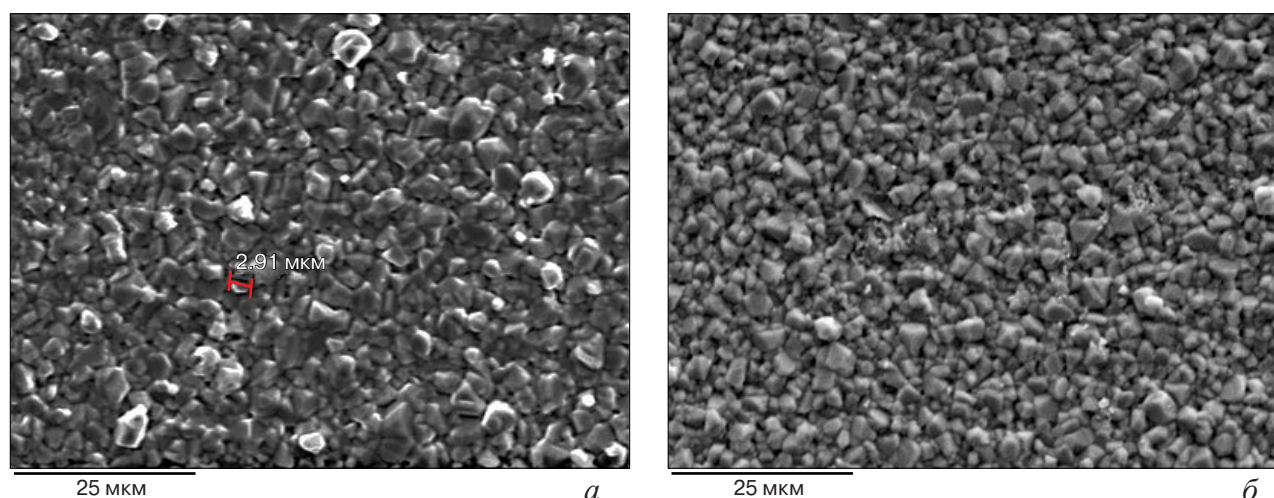


Рис. 2. Изображение морфологии пленки из порошков Caluxo до (а) и после (б) ресурсных испытаний, полученное на электронном микроскопе

Fig. 2. SEM morphology of films made from Caluxo powders (a) before and (b) after endurance tests

2. Проведение процессов синтеза CdTe, его специализированных отжига и сплавления для получения высококачественного материала заданного стехиометрического состава. К этой группе относятся работы по проведению таких процессов, как:

- получение CdTe основанного на методе прямого синтеза в кварцевом квазигерметичном реакторе;
- разделение синтезированного материала на слитки CdTe и CdTe со стенок тигля и реактора;
- специализированный (с использованием специального оборудования и оснастки) отжиг и сплавление материалов по разделенным группам с целью получения CdTe необходимого стехиометрического состава;
- сплавление CdTe мелкой фракции.

3. Проведение процессов измельчения полученных по технологическим операциям материалов для производства порошков готовой продукции необходимого гранулометрического состава (дробле-

ние и рассев), проведения процессов объединения и усреднения. Группа включает в себя работы по следующим процессам:

- измельчение на щековой дробилке и дисковом истерателе материалов, поступающих с операций синтеза и сплавления;
- ручное дробление и измельчение на дисковом истерателе с рассевом материала на необходимые заказчику гранулометрические фракции с использованием калиброванных сит и вибрационного стола;
- усреднение состава полученного материала путем перемешивания в установке, работающей по принципу «пьяная бочка».

4. Проведение промежуточного и итогового контроля качества материалов, к которому можно отнести процессы контроля:

- исходных материалов, а также готовой продукции на элементный состав масс-спектральным и атомно-эмиссионным (в некоторых случаях) методами анализа;

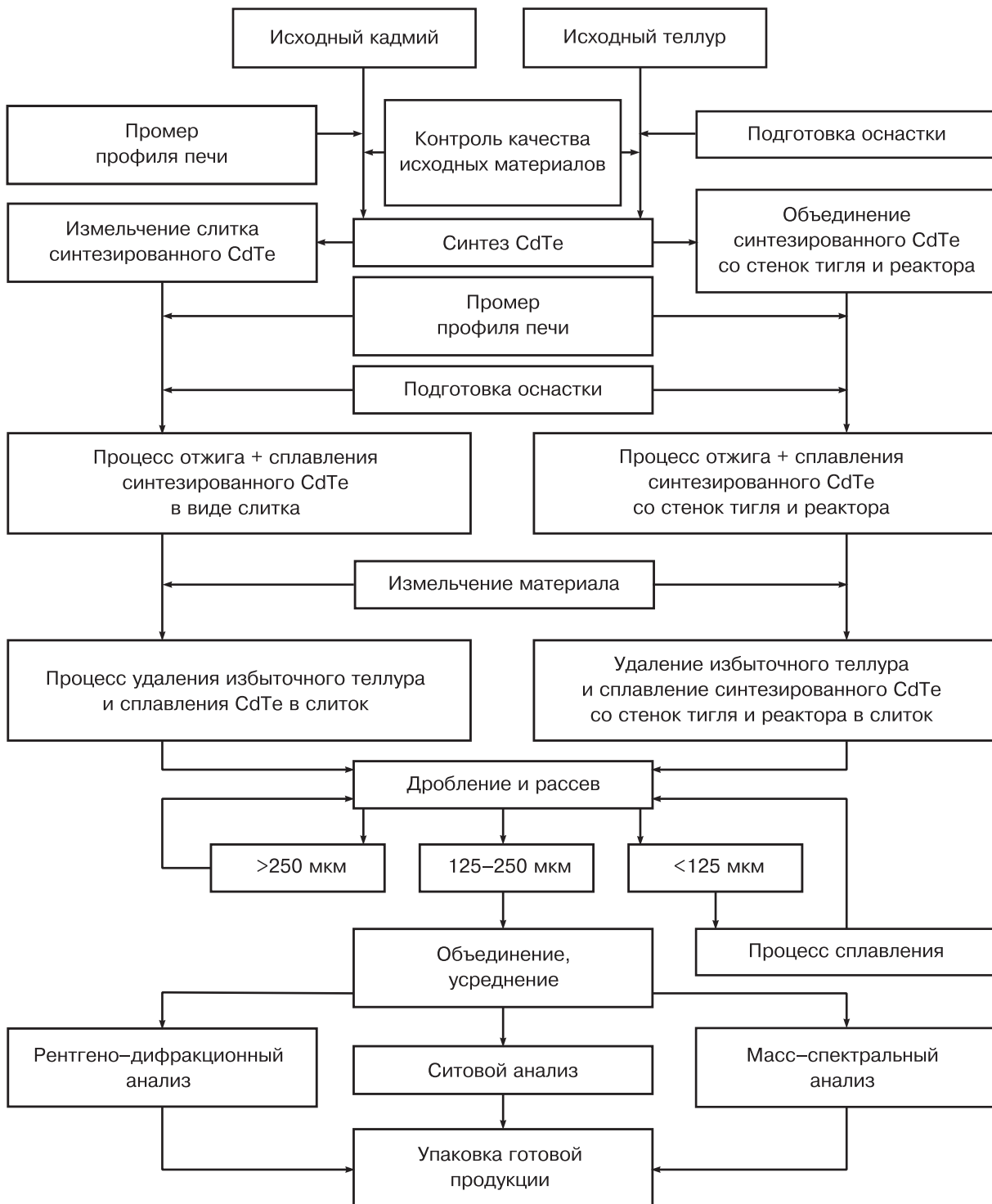


Рис. 3. Технологическая схема получения порошков CdTe заданных свойств и гранулометрического состава

Fig. 3. CdTe powder process route providing required properties and grain size distribution

– гранулометрического состава готовой продукции методом ситового анализа;

– фазового и стехиометрического состава готовой продукции рентгенодифракционным методом.

На первом этапе отработки процессов по новой схеме после каждого технологического передела проводили исследования полученных материалов на фазовый и элементный составы. Фазовый состав

исследовали по методике, описанной выше, элементный состав проверяли в Испытательном аналитико-сертификационном центре АО «Гиредмет» искровым масс-спектральным методом анализа на установке с двойной фокусировкой JMS-01-BM2 (производства фирмы JEOL, Япония).

На основе описанной выше схемы были проведены эксперименты, подтверждающие правильность выбранных решений: полученные материалы

имели чистоту по основному веществу (CdTe) не хуже марки 5N, фазы избыточного теллура или кадмия в полученном порошке CdTe выявлены не были.

Заключение

Используя процессы получения порошков CdTe на основе метода прямого синтеза изготовлена партия этого материала заданной чистоты и гранулометрического состава, на основе которой по оригинальной технологии изготовлены опытные СЭ, имеющие характеристики на уровне ведущих мировых стандартов. Осуществлены ресурсные испытания изготовленных СЭ.

Исследовано влияние наличия фазы свободного теллура в порошках на ресурсные характеристики изготовленных приборов при сопоставлении свойств полученных авторами порошков CdTe и порошков, используемых производителем, а также в пленках на их основе. Показано, что при наличии второй фазы в пленках CdTe избыточный теллур располагается преимущественно по границам зерен и может приводить к изменению электрофизических характеристик во время безаварийной эксплуатации изготовленных из них СЭ. Выявлено, что при этом происходит изменение параметров кристаллической структуры фазы CdTe в пленках, вызванное изменением стехиометрического состава фазы CdTe. Одновременно проведены исследования образцов тонких пленок методом рас-

тровой электронной микроскопии во вторичных электронах, не выявившие в них отличий как до, так и после ресурсных испытаний: покрытия были сплошные и однородные, пор и трещин не обнаружено, размеры зерен изменялись в диапазоне от 1 до 5 мкм. Структура и морфология пленок после ресурсных испытаний не менялись.

Разработана, обоснована и опробована новая технологическая схема получения порошков CdTe, основанная на методе прямого синтеза с учетом преимуществ и недостатков предыдущей технологии. Проведены эксперименты, подтверждающие правильность выбранных решений. Получены порошки чистотой по основному веществу (CdTe) не хуже марки 5N, фазы избыточного теллура или кадмия в которых не выявлены.

Основным преимуществом разработанной технологии является относительная простота ее аппаратного оформления при высоком выходе высококачественной продукции, а также масштабируемость производственных мощностей, что в значительной мере способствует возможности получения конкурентного ценообразования на изготовленную продукцию и как следствие снижению цены за 1 Вт на СЭ.

Дальнейшие работы, планируемые нами в данном направлении, заключаются в производстве опытных СЭ на основе порошков CdTe, полученных по новой технологической схеме, и исследовании их свойств.

Библиографический список

1. Марончук И.И., Широков И.Б. Методы определения водосодержания в нефти и нефтепродуктах, остаточного содержания нефтепродуктов в воде. *Энергетические установки и технологии*. 2017; 3(4): 130—145.
2. Марончук И.И., Санникович Д.Д., Мирончук В.И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2019; 62(2): 105—123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>
3. Широков И.Б., Марончук И.И. Современное состояние развития основных типов неатомных анаэробных двигательных и энергетических установок (обзор). *Энергетические установки и технологии*. 2019; 5(2): 37—50.
4. Jäger-Waldau A. PV status report 2018. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2018. 88 p. <https://doi.org/10.2760/924363>
5. Luceno-Sanchez J.A., Diez-Pascual A.M., Capilla R.P. Materials for photovoltaics: state of art and recent developments. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019; 20(4): 976. <https://doi.org/10.3390/ijms20040976>
6. Jäger-Waldau A. PV status report 2019. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2019. 85 p. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2019-11/kjna29938enn_1.pdf
7. Jäger-Waldau A. PV status report 2017. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2017. 90 p. <https://doi.org/10.2760/452611>
8. Meyer P.V. Technical and economic optimization for CdTe PV at the turn of the millennium. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*. 2000; 8(1): 161—169. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(200001/02\)8:13.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:13.0.CO;2-A)
9. Cadmium Telluride Solar Cells (данные, представленные Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках в области получения солнечных батарей на основе теллурида кадмия) URL: <https://www.nrel.gov/pv/cadmium-telluride-solar-cells.html> (дата обращения: 08.03.2023).
10. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики; под ред. Т. Коутса, Дж. Микина / пер. с англ. М.: Мир; 1988. 306 с.
11. Triboulet R., Siffert P. CdTe and related compounds; physics, defects, hetero- and nano-structures, crystal growth, surfaces and applications. Elsevier; 2010. 296 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17817-0>
12. Ivanov Y.M. Configuration of the cadmium telluride homogeneity boundaries. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014; 59(14): 1705—1714. <https://doi.org/10.1134/S0036023614140034>
13. Медведев С.А., Мартынов В.Н., Кобелева С.П. О возможности существования антиструктурных де-

фектов в нелегированном CdTe. *Известия АН СССР. Кристаллография*. 1983; 28(2): 394.

14. Кобелева С.П. Определение отклонения от стехиометрии в широкозонных полупроводниковых соединениях $A^{IV}B^{VI}$ по составу равновесной паровой фазы. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(2): 107—114. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-107-114>

15. National Renewable Energy Laboratory. Best research-cell efficiency chart (данные, представленные Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках солнечных элементов с максимальной эффективностью за 2022 год). URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата обращения: 08.03.2023).

16. Коломоец А.Г., Хрипко С.Л. Влияние технологии получения тонких пленок теллурида кадмия на эффективность работы солнечных элементов на их основе. *Металлургия*. 2019; (1(41)): 60—63.

17. McCandless B.E., Sites J.R. Cadmium telluride solar cells. In: *Handbook of photovoltaic science and engineering*; A. Luque, S. Hegedus, eds. John Wiley & Sons, Ltd; 2011. P. 600—641. <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch14>

18. Khrypunov G.S., Vambol S., Deyneko N., Suchikova Y. Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016; 84(6/5): 12—18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85617>

19. Колтун М.М. Солнечные элементы. М.: Наука; 1987. 191 с.

20. Geisthardt R.M., Topic M., Sites J.R. Status and potential of CdTe solar-cell efficiency. *IEEE Journal of Photovoltaic*. 2015; 5(4): 1217—1221. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2434594>

21. Патент (РФ) № 2776574, Кл. С01В 19/02 С22В 9/04. Давыдова Е.В., Егоров М.А., Марончук И.И., Санникович

Д.Д. Способ глубокой очистки металлов. Заявл.: 17.06.2021, опубл.: 22.07.2022. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2776574C1/ru>

22. Патент (РФ) № 2777064, Кл. С01В 19/02 С22В 9/04. Давыдова Е.В., Егоров М.А., Марончук И.И., Санникович Д.Д. Устройство для глубокой очистки металлов. Заявл.: 17.06.2021; опубл.: 01.08.2022. URL: <https://patent.ru/patent/RU2776574C1>

23. Абрютин В.Н., Давыдова Е.В., Егоров М.А., Марончук И.И., Санникович Д.Д. Глубокая очистка теллура, цинка и кадмия для применения в электронике. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(2): 164—174. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-164-174>

24. Абрютин В.Н., Марончук И.И., Потолоков Н.А., Санникович Д.Д., Черкашина Н.И. Глубокая очистка теллура: усовершенствование оборудования и технологии с применением моделирования технологического процесса. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(3): 214—226. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-214-226>

25. АДВ–Инжиниринг. Теллурид кадмия (данные о свойствах порошков теллурида кадмия предоставленные ООО АДВ–Инжиниринг и производимых в организации согласно действующих в компании технических условий). URL: <https://www.adv-engineering.ru/metal/?type=a2-b4&title=%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D1%83%D1%80%D0%B8%D0%B4%20%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%BC%D0%B8%D1%8F> (дата обращения: 08.03.2023).

26. Calyxo GmbH – CdTe Thin Film Solar Module (данные предоставленные немецкой компанией Calyxo GmbH в рекламном фильме о получении тонкопленочных солнечных модулей на основе теллурида кадмия). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Hj6S1pdnlo8&t=21s> (дата обращения: 08.03.2023).

References

1. Shirokov I.B., Maronchuk I.I. Methods for determining water content in oil and petroleum products, residual content of oil products in water. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2017; 3(4): 130—145. (In Russ.)

2. Maronchuk I.I., Sanikovich D.D., Mironchuk V.I. Solar cells: current state and development prospects. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2019; 62(2): 105—123. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-23>

3. Shirokov I.B., Maronchuk I.I. The current state of development of the main types of non-nuclear anaerobic motor and energy systems (review). *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2019; 5(2): 37—50. (In Russ.)

4. Jäger–Waldau A. PV status report 2018. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2018. 88 p. <https://doi.org/10.2760/924363>

5. Luceno–Sanchez J.A., Diez–Pascual A.M., Capilla R.P. Materials for photovoltaics: state of art and recent developments. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019; 20(4): 976. <https://doi.org/10.3390/ijms20040976>

6. Jäger–Waldau A. PV status report 2019. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2019. 85 p. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2019-11/kjna29938enn_1.pdf

7. Jäger–Waldau A. PV status report 2017. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2017. 90 p. <https://doi.org/10.2760/452611>

8. Meyer P.V. Technical and economic optimization for CdTe PV at the turn of the millennium. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*. 2000; 8(1): 161—169. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(200001/02\)8:13.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:13.0.CO;2-A)

9. Bonnet D., Meyers P. Cadmium–telluride — material for thin film solar cells. *Journal of Materials Research*. 1998; 13(10): 2740—2753. <https://doi.org/10.1557/JMR.1998.0376>

10. Coutts T.J., Meakin J.D., eds. Current Topic in Photovoltaics. Academic Press; 1985. 279 p. (Russ. Transl.: *Sovremennye problemy poluprovodnikovoi fotoenergetiki*; Kouts T., Mikin Dzh., eds. Moscow: Mir; 1988. 306 p.)

11. Triboulet R., Siffert P. CdTe and related compounds; physics, defects, hetero- and nano-structures, crystal growth, surfaces and applications Elsevier; 2010. 296 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17817-0>

12. Ivanov Y.M. Configuration of the cadmium telluride homogeneity boundaries. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014; 59(14): 1705—1714. <https://doi.org/10.1134/S0036023614140034>

13. Medvedev S.A., Martynov V.N., Kobleva S.P. On the possibility of the existence of antistructural defects in

undoped CdTe. *Izvestiya AN SSSR. Kristallografiya*. 1983; 28(2): 394. (In Russ.)

14. Kobeleva S.P. Determination of stoichiometry deviation in wide-band II–VI semiconductors on the basis of equilibrium vapor phase composition. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(2): 107–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-107-114>

15. National Renewable Energy Laboratory. Best research–cell efficiency chart (data provided by the National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) on the development of solar cells with maximum efficiency for 2022). <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed on 08.03.2023).

16. Kolomoets H., Khripko S. Influence of technology of receipt of thin–films of cadmium telluride on efficiency of work of sun elements on their basis. *Metallurgiya*. 2019; (1(41)): 60–63. (In Russ.)

17. McCandless B.E., Sites J.R. Cadmium telluride solar cells. In: *Luque A., Hegedus S., eds. Handbook of photovoltaic science and engineering*; John Wiley & Sons, Ltd; 2011. P. 600–641. <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch14>

18. Khrypunov G.S., Vambol S., Deyneko N., Suchikova Y. Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2016; 84(6/5): 12–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85617>

19. Koltun M.M. Solar cells. Moscow: Nauka; 1987. 191 p. (In Russ.)

20. Geisthardt R.M., Topic M., Sites J.R. Status and potential of CdTe solar–cell efficiency. *IEEE Journal of Photovoltaic*. 2015; 5(4): 1217–1221. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2434594>

21. Patent (RU) No 2776574, Кл. C01B 19/02 C22B 9/04. Method for deep cleaning of metals. Davydova E.V., Egorov M.A., Maronchuk I.I., Sanikovich D.D. Appl.: 17.06.2021, publ.: 22.07.2022. (In Russ.). <https://patents.google.com/patent/RU2776574C1/ru>

22. Patent (RU) No 2777064, Кл. C01B 19/02 C22B 9/04. Davydova E.V., Egorov M.A., Maronchuk I.I., Sanikovich D.D. Device for deep cleaning of metals. Appl.: 17.06.2021; publ.: 01.08.2022. (In Russ.). <https://patent.ru/patent/RU2776574C1>

23. Abryutin V.N., Davydova E.V., Egorov M.A., Maronchuk I.I., Sanikovich D.D. Deep purification of tellurium, zinc and cadmium for use in electronic devices. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(2): 164–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-164-174>

24. Abryutin V.N., Maronchuk I.I., Potolokov N.A., Sanikovich D.D., Cherkashina N.I. Deep refinement of tellurium: equipment and process improvement through process simulation. *Modern Electronic Materials*. 2022; 8(3): 97–105. <https://doi.org/10.3897/j.moem.8.3.97596>

25. *ADV–engineering. Cadmium telluride* (data on the properties of cadmium telluride powders provided by ADV–Engineering LLC and produced in the organization in accordance with the technical specifications in force in the company). (In Russ.). <https://www.adv-engineering.ru/metal/?type=a2-b4&title=%D0%A2%D0%B5%D0%B%D0%BB%D1%83%D1%80%D0%B8%D0%B4%20%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%BC%D0%B8%D1%8F> (accessed on 08.03.2023).

26. *Calyxo GmbH – CdTe Thin Film Solar Module*. <https://www.youtube.com/watch?v=Hj6S1pdl08&t=21s> (accessed on 08.03.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Марончук Игорь Игоревич — канд. техн. наук, начальник производства, ООО «АДВ–Инжиниринг», 1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2541-961X>; e–mail: igimar@mail.ru

Санникович Дарья Дмитриевна — главный технолог, ООО «АДВ–Инжиниринг», 1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8576-1199>; e–mail: sanikovichd@mail.ru

Давыдова Елена Васильевна — коммерческий директор, ООО «АДВ–Инжиниринг», 1–й Люсиновский пер., д. 3Б, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0834-9007>

Табачкова Наталия Юрьевна — канд. физ.–мат. наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0169-5014>; e–mail: ntabachkova@gmail.com

Igor I. Maronchuk — Cand. Sci. (Eng.), Director of Operations, ADV–Engineering, LLC, 3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2541-961X>; e–mail: igimar@mail.ru

Daria D. Sanikovich — Chief Technologist, ADV–Engineering, LLC, 3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8576-1199>; e–mail: sanikovichd@mail.ru

Elena V. Davydova — Commercial Director, ADV–Engineering, LLC, 3B 1st Lyusinovsky Lane, Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0834-9007>

Nataliya Yu. Tabachkova — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0169-5014>; e–mail: ntabachkova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2022; поступила после доработки 24.12.2022; принята к публикации 17.01.2023
Received 13 December 2022; Revised 24 December 2022; Accepted 17 January 2023

* * *