

УДК 544.014: 546.05

DOI: 10.15372/KhUR2024592

EDN: WCECEW

## Синтез индий танталата свинца $Pb_2InTaO_6$ и системы $(1 - x)Pb_2YbNbO_6 + xPb_2FeNbO_6$ ( $x = 0.1$ ) с использованием механохимической активации и радиационно-термического спекания

А. А. ГУСЕВ<sup>1</sup>, М. А. МИХАЙЛЕНКО<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
Новосибирск, Россия

E-mail: gusev@solid.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт ядерной физики СО РАН,  
Новосибирск, Россия

(Поступила 04.04.2024; после доработки 03.05.2024; принята к печати 20.05.2024)

### Аннотация

Изучено влияние механической активации и радиационно-термического спекания на синтез индий танталата свинца, применяемого в оптической электронике и конденсаторной технике, и системы  $(1 - x)Pb_2YbNbO_6 + xPb_2FeNbO_6$  ( $x = 0.1$ ), твердые растворы которой обладают высокими ди-, пьезо- и магнитоэлектрическими свойствами. Исследованы условия формирования перовскитной и пироклорной фаз как в процессе механохимического синтеза, так и при последующем спекании в широком диапазоне температур с различным временем воздействия электронного пучка. Для снижения электропроводности керамики в шихту вводился карбонат лития, который также стабилизирует структуру перовскита. Показано, что выбор условий подготовки шихты для спекания определяет характеристики конечного продукта. Проведено сравнение различных способов такой подготовки, отличающихся порядком механической активации и условиями введения компонентов. Установлены оптимальные условия, позволяющие получить пьезокерамику с наибольшим количеством фазы перовскита и максимальной плотностью. Проведена оценка перспективности использования метода радиационно-термического спекания на нескольких пьезокерамических системах. Установлено, что при радиационно-термическом синтезе образуется ряд промежуточных фаз, которые при обычном спекании никогда не появлялись. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что спекание некоторых свинецсодержащих систем на ускорителе под воздействием электронного пучка является перспективным способом синтеза монофазного сложного оксида со структурой перовскита. Разработанный способ представляет практический интерес для получения пьезокерамики.

**Ключевые слова:** механохимический синтез, перовскит, пироклор, спекание, рентгенофазовый анализ, ускоренные электроны

### ВВЕДЕНИЕ

Пьезокерамика находит широкое применение на транспорте, в энергетике, космической и лазерной технике, микроэлектронике, оптических

инструментах. Она служит также перспективной основой для создания керамических конденсаторных, пьезоэлектрических, пироэлектрических и позисторных материалов. При этом получение монофазных перовскитов чрезвычайно важно,

так как наличие в керамике заметного количества фазы пироклора снижает ее технические характеристики.

Способы получения монофазного перовскита индий ниобата свинца  $\text{PbIn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$  описаны в [1]. В первом случае спекание из оксидов проводили при 1050 и 1100 °С в течение 4 ч. Для стабилизации структуры перовскита вводился карбонат лития  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  в пределах 2–10 мас. % сверх стехиометрии. Во втором случае синтез  $\text{PbIn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$  осуществляли через промежуточную фазу ранее синтезированного прекурсора  $\text{InNbO}_4$ :  $2(\text{InNbO}_4) + 4\text{PbO} = 4(\text{PbIn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3)$ . Однако данные методы оказались безуспешными для синтеза индий танталата свинца, так как получить монофазный  $\text{PbIn}_{1/2}\text{Ta}_{1/2}\text{O}_3$  со структурой перовскита не удалось.

Известен способ получения индий танталата свинца путем выращивания кристаллов из расплава [2]. В качестве стабилизатора структуры вводился  $\text{V}_2\text{O}_5$ . При молярном соотношении In и Ta, равном 1 : 1, получены только кристаллы пироклора. Введение вдвое большего количества  $\text{In}_2\text{O}_3$  в исходную смесь позволяет вырастить смесь кристаллов пироклора и перовскита. Кристаллы со структурой перовскита характеризовались размерами  $0.3 \times 0.3 \times 0.2$  мм. Недостатком данного способа можно считать невозможность получения монофазного продукта индий танталата свинца со структурой перовскита. Требуется дополнительная сортировка под микроскопом кристаллов по видам фаз. И совершенно непонятно, как из данных кристаллов изготовить изделие для промышленного применения, сохранится ли при этом структура перовскита.

Еще один способ получения индий танталата свинца со структурой перовскита описан в [3, 4]. В данных работах сначала проводят спекание соединения  $\text{InTaO}_4$  путем прокаливания  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  при 1200 °С в течение 24 ч с последующей заливкой расплавленного  $\text{PbO}$  для образования стехиометрической композиции. Затем продолжают процесс в устройстве быстрого спекания, которое состоит из трубчатой печи и системы внешнего привода, позволяющей перемещать тигель с образцом в печь. Спекание проводят путем нагрева лазером при 1050 °С в течение 1 мин. По утверждению авторов, данные рентгеновской дифракции подтверждают монофазность полученного образца. Плотность керамики составляла около 92 % от теоретического значения. Размеры образца: толщина 0.15 мм, диаметр 4 мм. Данное техническое решение не

лишено недостатков, таких как длительность процесса подготовки образцов для спекания, получение тонких пленок маленького размера, невозможность получать объемные образцы.

Данные о других способах получения монофазного  $\text{PbIn}_{1/2}\text{Ta}_{1/2}\text{O}_3$  со структурой перовскита в литературе отсутствуют.

Один из методов спекания керамических изделий заключается в использовании эффекта разогрева образцов при воздействии на них пучка ускоренных электронов. При этом происходит значительное ускорение диффузионно-контролируемых процессов, т. е. наблюдается радиационно-термический эффект [5]. Этот метод позволяет проводить твердофазные превращения при меньших температурах и значительно сократить время протекания процесса, что может быть актуальным при наличии летучих компонентов в процессе получения соединений заданного состава [6]. Иногда при радиационно-термическом спекании наблюдается появление новых или стабилизация промежуточных фаз [7].

Цель данной работы – исследование возможности получения  $\text{PbIn}_{1/2}\text{Ta}_{1/2}\text{O}_3$  с максимальным количеством фазы со структурой перовскита, а так же проведение синтеза системы  $(1-x)\text{Pb}_2\text{YbNbO}_6 + x\text{Pb}_2\text{FeNbO}_6$ , где  $x = 0.1$ , используя механохимическую активацию и последующее радиационно-термическое спекание.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Синтез образцов

Исходными реагентами для синтеза соединений служили порошки  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  квалификаций не хуже “х. ч.” Смеси порошков активировались в планетарно-центробежной мельнице АГО-2 (Россия) [8] в стальных барабанах объемом 200 мл в воздушной атмосфере при ускорении шаров 40g (392 м/с<sup>2</sup>). Для активации использовали стальные шары диаметром 8 мм, общей массой 200 г, отношение массы вещества к массе шаров – 1 : 20. Для предотвращения намолта железа с шаров и стенок барабанов (может достигать 1–2 мас. %) проводили футеровку шаров и барабанов в процессе предварительной активации исходных реагентов в течение нескольких секунд, затем удаляли этот материал из барабанов. При этом на стенках барабанов и шарах остается налипший материал, который предотвращает дальнейший намолт железа. Затем загружали другую порцию реагентов и продолжали активацию. В этом

случае намол железа составляет сотые доли процента [9].

Взвешивание осуществлялось на весах UW 220Н (Shimatzu, Япония) с точностью 0.001 г, геометрические размеры образцов определялись с помощью микрометра с точностью 0.01 мм.

Из механически активированных порошков были приготовлены образцы в виде таблеток диаметром 10 мм и толщиной около 2 мм на гидравлическом прессе с усилием 1 ГПа без использования пластификатора.

#### Радиационно-термическое спекание

Электронно-лучевую обработку осуществляли с использованием импульсного ускорителя ИЛУ-6 (ИЯФ СО РАН, Россия). Условия обработки: энергия ускоренных электронов 2.4 МэВ; ток пучка 328 мА; длительность импульса 500 мкс. Образцы помещались в термически изолированный реактор с дном и стенками из шамотного кирпича. Крышкой реактора служила пластина пенекварца толщиной 1–1.5 мм, через которую подводился пучок ускоренных электронов. Температура в реакторе контролировалась с использованием Pt/Pt-Rh-термопар. Скорость нагрева и стабилизацию температуры контролировали по частоте следования импульсов с использованием модуля Fild Point (National Instruments, США). Частота следования импульсов – до 12 Гц.

#### Физико-химические методы исследования

Рентгенофазовый анализ (РФА) исходных реагентов, образующихся продуктов активации до и после термической обработки, проводили методом порошковой дифракции с использованием дифрактометра ДРОН-3 (Россия) на  $CuK_{\alpha}$ -излучении, схема фокусировки по Брэггу–Брентано, а также на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker, Германия). Расчет содержания фаз перовскита и пироклора осуществлялся с помощью программы Powder-Cell 2.4. Точность расчетов по программе – один знак после запятой. Определяемая величина округлялась до целого значения. Однако при расчете соотношения фаз по двум главным интегральным интенсивностям рефлексов, измеряемым другими программами (например, Origin), погрешность достигала 2 %. Полагаем, что это реальная величина погрешности.

Электронно-микроскопические исследования проводили с использованием сканирующего микроскопа S3400N (Hitachi, Япония). Также проводились исследования пространственного рас-

пределения элементов с использованием рентгенофлуоресцентной приставки INCA (Oxford Instruments, ускоряющее напряжение 20 кВ).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

##### *Синтез образцов $Pb_2InTaO_6 + Li_2CO_3$ (1 мас. %) спеканием на ускорителе под воздействием электронного пучка*

Соль  $Li_2CO_3$  вводилась в количестве 1 мас. % сверх стехиометрии для снижения электропроводности керамики. Образцы для синтеза готовились двумя различными способами.

В способе I карбонат лития добавлялся в смесь оксидов индия и тантала, состав тщательно усреднялся в ступке, а затем проводилась активация на мельнице в течение 10 мин. Затем в полученную смесь добавлялся оксид свинца, и активация проводилась еще 10 мин. Образец обозначен: образец I.

В способе II оксиды индия и тантала активировались 10 мин. Карбонат лития добавлялся в оксид свинца, а затем тщательно усредненная смесь добавлялась в уже активированные оксиды индия и тантала, и активация проводилась еще 10 мин. Образец обозначен: образец II.

Далее выполнялось спекание спрессованных образцов под действием электронного пучка.

##### *Нагрев образцов электронным пучком в течение 30 мин при 800 и 1000 °С*

При спекании образца I кроме кубической фазы перовскита и пироклора (преобладающая фаза) появляются промежуточные фазы 1 и 2 (рис. 1). Фаза 1 – это тетрагональная фаза перовскита, о чем свидетельствуют рефлекссы полученных дифрактограмм. При температуре 800 °С в образце появляется большое количество оксида свинца, который не образуется при обычном термическом спекании. На дифрактограмме это еще не прореагировавший оксид свинца PbO (фазы  $\beta$ -PbO желтого с пространственной группой S.G. *Pbta* и  $\alpha$ -PbO красного – S.G. *Stta*) и фаза 2 –  $Pb_3O_4$ , который образуется в результате фазовых переходов при нагреве на воздухе исходного оксида свинца: PbO при нагреве до 330 °С переходит в  $Pb_{12}O_{19}$ , при 370 °С – в  $Pb_{12}O_{17}$ , при 540 °С – в  $Pb_3O_4$ . Плотность полученных образцов – 7.74 г/см<sup>3</sup>.

Как следует из данных РФА (см. рис. 1), спекание образца I при 1000 °С приводит к исчезновению исходного оксида свинца (PbO). Ве-

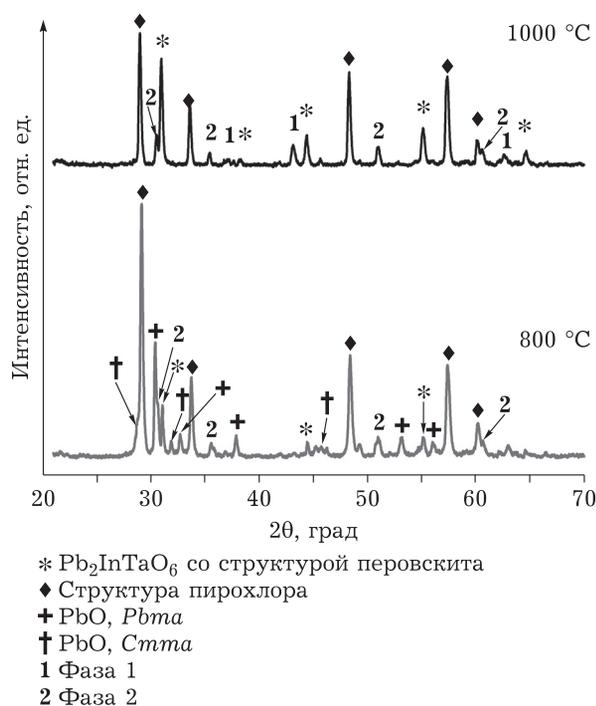


Рис. 1. Дифрактограммы образцов из шихты, подготовленной по способу I и спеченной под воздействием электронного пучка при 800 и 1000 °С в течение 30 мин.

роятно, он частично расходуется на реакцию взаимодействия с образованием кубической структуры перовскита (которой стало значительно больше), частично на образование фазы 2 ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ). Кроме того, на дифрактограмме появилась фаза 1. Появление фаз 1 и 2, вероятно, связано с неравномерным прогревом образцов под действием пучка электронов. При этом верхний слой образцов, как будет показано ниже, разогревается вплоть до температуры плавления, в то время как нижние слои образцов еще довольно холодные. В результате диффузионные процессы резко замедляются и не дают возможности выровняться фазовому составу в образцах. Плотность полученных образцов – 7.78 г/см<sup>3</sup>.

При спекании образца II при 800 и 1000 °С (рис. 2) значительно увеличивается количество фазы со структурой перовскита (cubic, S.G.  $Pm-3m$  (No. 221)), по сравнению с образцом I, и сохраняется фаза 2. Количество фазы перовскита для образца, спеченного при 800 °С, составляет 90 % (плотность – 7.74 г/см<sup>3</sup>). Для образца, спеченного при 1000 °С, количество фазы перовскита – 84 % (плотность – 8.2 г/см<sup>3</sup>). Образцы для рентгеновской съемки, спеченные при температуре до 800 °С, обычно не шлифуются, а спеченные при температуре более 800 °С – шлифуются всегда. Учитывая, что цель данной

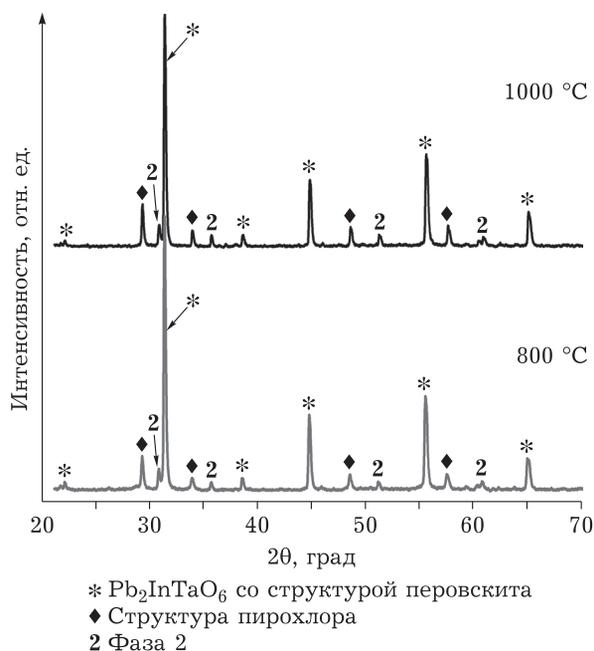


Рис. 2. Дифрактограммы образцов из шихты, подготовленной по способу II и спеченной под воздействием электронного пучка при 800 и 1000 °С в течение 30 мин.

работы – определение условий получения образцов с максимальным количеством фазы перовскита, данные по промежуточным результатам не приводятся.

Полученные образцы после спекания заметно деформированы (в форме тарелочки), что добавляет сложности для определения их плотности, шлифовки и последующего измерения электрофизических характеристик.

#### Нагрев образцов электронным пучком в течение 20 мин при 900 °С

В работах [3–4] образцы нагревались лазером непродолжительное время (~40 с). Учитывая опыт авторов, были проведены эксперименты по уменьшению времени обработки пучком электронов. Время нагрева данной серии образцов было сокращено с 30 до 20 мин. Поскольку наиболее плотные образцы при спекании в печи (см. подраздел Синтез образцов спеканием в печи) получились в интервале температур 900–950 °С, температуру спекания установили 900 °С.

В результате экспериментов с образцами I было установлено образование 4 фаз. Кроме фаз перовскита и пирохлора образцы содержат как фазу 2, так и еще непрореагировавший оксид свинца  $\text{PbO}$  с пространственной группой  $StTa$  ( $\alpha$ - $\text{PbO}$  красный, который получается из  $\beta$ - $\text{PbO}$

желтого с пространственной группой *S.G. P6mm*). При механической активации и даже при растирании в ступке  $\beta$ - $PbO$  желтого он переходит в  $\alpha$ - $PbO$  красный – *S.G. Cmma*, т. е. происходит фазовый переход из  $\beta$ -оксида свинца желтого в  $\alpha$ -оксид свинца красный, что и подтверждается наличием заметного рефлекса на получаемых нами дифрактограммах (в статье не приводятся). В образцах II количество промежуточных фаз меньше, а фаза перовскита заметно преобладает над фазой пироклора.

Содержание фазы перовскита при спекании образцов I и II составляет 18 и 71 % соответственно.

#### **Нагрев образцов электронным пучком в течение 1 мин при 950 °С**

В экспериментах с данной серией образцов время спекания было сокращено до 1 мин. Однако учитывая, что в предыдущей серии образцов имелись еще не прореагировавшая фаза оксида свинца ( $\alpha$ - $PbO$  красный – *S.G. Cmma* (No. 67)) и фаза 2, температура синтеза была увеличена до 950 °С.

Полученные результаты спекания образца I похожи на результаты предыдущего синтеза. В спеченном образце также имеются фаза  $\alpha$ - $PbO$  красный и фаза 2. В образце II количество примесных фаз меньше, а количество фазы перовскита превышает количество фазы пироклора. Содержание фазы перовскита при спекании образцов I и II составляет 26 и 73 % соответственно.

Поскольку количество фазы перовскита заметно не возросло, было увеличено время спекания образцов до 20 мин.

#### **Нагрев образцов электронным пучком при 950 °С в течение 20 мин**

Во всех предыдущих опытах навеска образцов составляла ~0.7 г. Образцы после спекания получались однородного темно-коричневого цвета толщиной ~1.3 мм. Для предотвращения сильной деформации при спекании образцов в новых условиях (950 °С в течение 20 мин) приготовлены образцы толщиной 1.7 мм (навеска ~0.9 г). Образец II был также однородного темно-коричневого цвета. Образец I наполовину своей толщины был светло-коричневого цвета (сторона, прилегающая к подложке), а другая сторона, на которую падал пучок, – темно-коричневого цвета. На светлой стороне образца содержание фазы перовскита – 10 %, на темной стороне – 16 %. В опытах с образцом II содержание фазы перовскита – 67 %. Во всех проведенных экспери-

ментах наибольшее количество фазы со структурой перовскита при любых временах спекания получено для образца II.

На рис. 3, а приведено электронное изображение участка образца (со стороны пучка) после электронно-лучевого прогрева при 950 °С в течение 20 мин. Видно, что верхний слой образцов разогревается вплоть до температуры плавления, на снимке наблюдаются оплавленные поверхностные кристаллы. Приведено распределение сигналов от элементов Pb, In, Ta по площади (см. рис. 3, б–г). Светлые участки изображений соответствуют более интенсивному сигналу, что означает концентрирование данного элемента в конкретном месте. В случае свинца (см. рис. 3, б) можно судить о более равномерном распределении элементов, неоднородность по яркости может быть связана с морфологией образца. В случае индия и тантала (см. рис. 3, в и г соответственно) наблюдается их неравномерное распределение по поверхности образца. Присутствуют места явного скопления данных элементов (яркие пятна на темном фоне). Для тантала неравномерность более выражена, чем для индия.

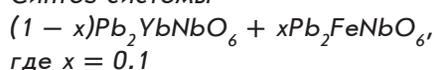
Для сравнения результатов синтеза керамики путем нагрева электронным пучком далее приведены данные, полученные при спекании образцов в печи ПВК-1,4-8 (Россия).

#### **Синтез образцов $Pb_2InTaO_6 + Li_2CO_3$ (1 мас. %) спеканием в печи в течение 2 ч**

После обжига образцов I и II в печи в интервале 600–1100 °С в обоих случаях при температуре 950 °С получились образцы с максимальной плотностью и наибольшим содержанием фазы перовскита. При спекании образца I содержание фазы перовскита составляет 79 %, плотность – 8.55 г/см<sup>3</sup> (88.5 % от теоретической), а для образца II количество фазы перовскита – 93 %, плотность – 8.6 г/см<sup>3</sup> (89 % от теоретической). Теоретическая плотность – 9.655 г/см<sup>3</sup> (карточка 43-268 ASTM).

Учитывая, что превзойти результаты, полученные при спекании в обычной печи, не удалось, а спекание на ускорителе процесс весьма дорогой, эксперименты на данном этапе синтеза  $Pb_2InTaO_6$  были приостановлены.

#### **Синтез системы**



В данном случае шихта была приготовлена на основе ранее синтезированного прекурсора

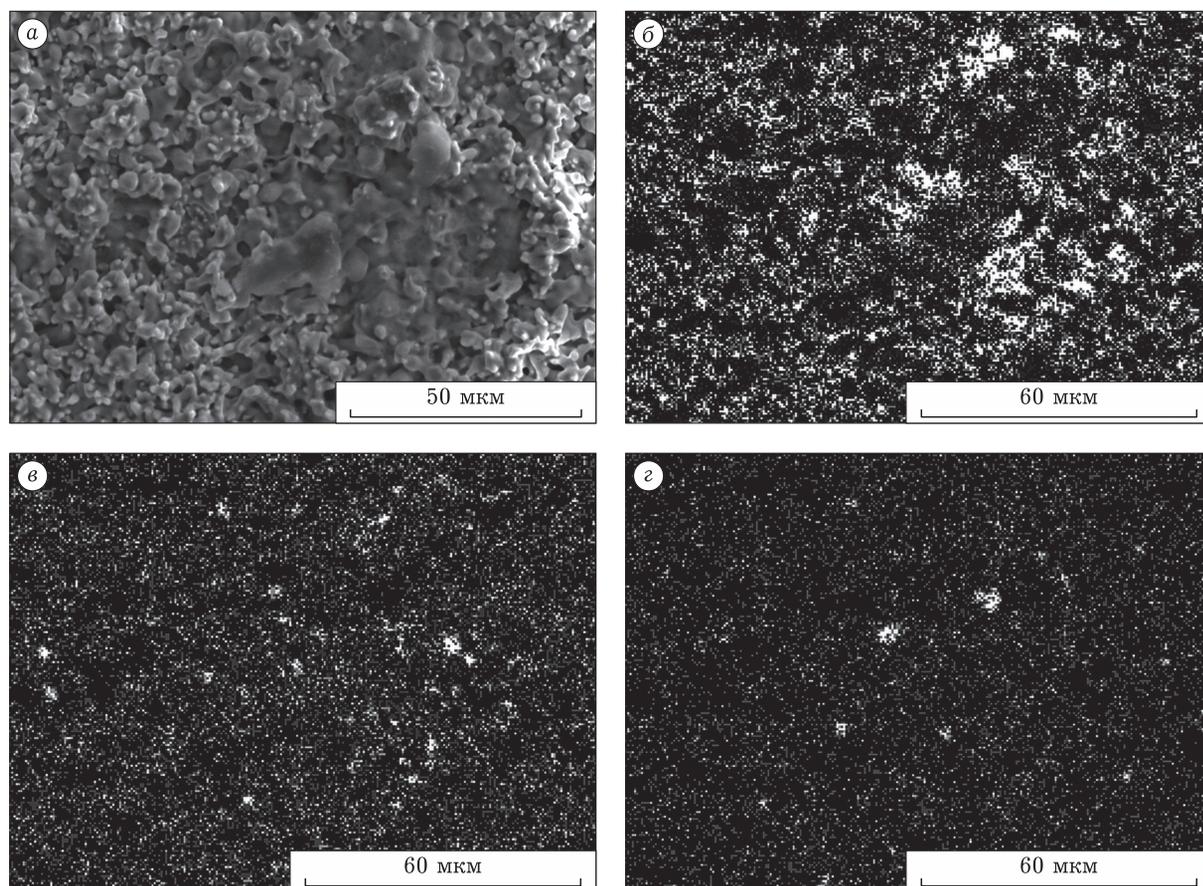


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности образца со стороны воздействия на него электронного пучка при 950 °С в течение 20 мин (а); пространственное распределение элементов: свинца (б); индия (в); тантала (г).

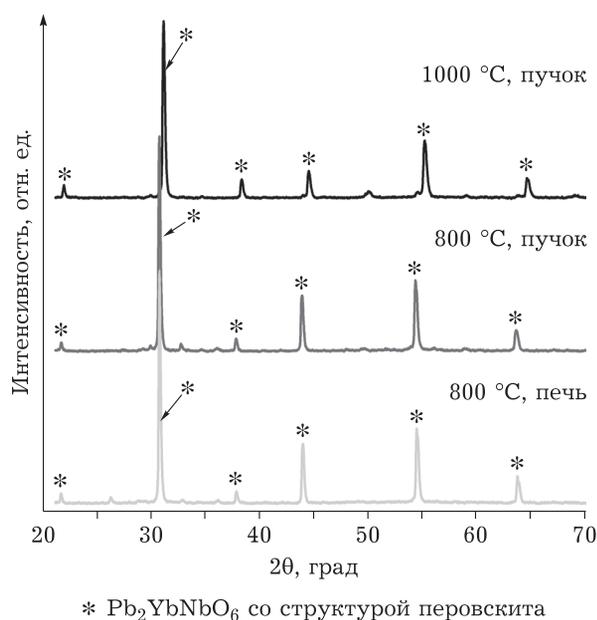


Рис. 4. Дифрактограммы системы  $0.9(\text{PbO} + \text{YbNbO}_4) + 0.1\text{Pb}_2\text{FeNbO}_6$  из шихты, приготовленной с прекурсором, синтезированным при 1300 °С, и спеченной при различных условиях: в печи при 800 °С (1); электронным пучком при 800 (2) и 1000 °С (3).

(ниобата иттербия  $\text{YbNbO}_4$ ), который был получен из оксидов иттербия и ниобия прокаливанием в печи при 1000 и 1300 °С. В синтезированном при 1000 °С прекурсор в заметных количествах присутствовали исходные оксиды. После прокаливания при 1300 °С в полученном образце исходные оксиды находились в следовых количествах. На дифрактограмме этого образца интенсивность основных рефлексов была соизмерима с уровнем фона.

Спекание синтезированных образцов  $\text{YbNbO}_4$  с железом и свинцом осуществлялось на ускорителе электронным пучком. Температура, создаваемая электронным пучком, соответствовала 800 и 1000 °С. Нагрев проводили со скоростью 25 °С/мин и выдержкой при заданных температурах в течение 30 мин.

Как следует из полученных результатов, в образцах, синтезированных с использованием прекурсора, полученного при 1000 °С, после спекания под пучком при 800 °С формируется практически чистая однофазная структура кубического перовскита. После обжига электрон-

ным пучком при 1000 °С формируется тетрагональная структура перовскита.

Обжиг при тех же условиях образца с прекурсором, приготовленным при 1300 °С (рис. 4), во всех случаях приводит к формированию структуры кубического перовскита, но параметр решетки образцов несколько меньше (рефлексы смещены в сторону больших углов). Количество фазы перовскита в данной керамике составляет 100 %.

На основании полученных результатов можно заключить, что спекание на ускорителе электронным пучком некоторых систем, содержащих свинец, может быть использовано на практике для получения пьезокерамики со структурой монофазного перовскита.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние условий синтеза и спекания образцов на фазовый состав и структуру синтезированных соединений. Установлено, что основным фактором, определяющим получение целевого продукта  $Pb_2InTaO_6$ , является выбор условий подготовки шихты – последовательность введения компонентов и их активация. В образцах II количество промежуточных фаз меньше, а количество фазы перовскита значительно больше фазы пирохлора. Способ II подготовки образцов обеспечивает возможность получения продукта с наибольшим содержанием фазы перовскита и наибольшей плотностью.

Установлено, что на качество образцов влияет толщина таблеток механически активированных реагентов. При спекании тонких образцов происходит их заметная деформация. Увеличение толщины приводит к неравномерности прогрева и неоднородности фазового состояния продукта. Негативное влияние толщины таблеток наблюдалось только для образцов I.

По данным электронной спектроскопии пространственного распределения элементов установлена локализация элементов по поверхности образца  $Pb_2InTaO_6$ . Показано, что свинец распределен достаточно равномерно, в то время как индий и тантал образуют локальные конгломераты.

Для системы  $(1-x)Pb_2YbNbO_6 + xPb_2FeNbO_6$  ( $x = 0.1$ ) исследовано влияние температуры синтеза прекурсора и условий обработки электронным пучком на структуру образующегося

перовскита. Образец, синтезированный с использованием прекурсора – ниобата иттербия  $YbNbO_4$  (синтез при 1000 °С), после обработки электронным пучком при 800 °С представляет практически чистую монофазную систему перовскита кубической структуры. Повышение температуры обжига электронным пучком до 1000 °С приводит к формированию тетрагональной структуры перовскита.

В образцах, синтезированных с использованием прекурсора (синтез при 1300 °С), при обжиге в тех же условиях во всех случаях формируется структура кубического перовскита.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что спекание некоторых свинецсодержащих систем на ускорителе электронным пучком – перспективный способ синтеза монофазного сложного оксида со структурой перовскита, представляющего практический интерес для получения пьезокерамики.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХТТМ СО РАН (проекты № 121032500062-4 и 122032900067-4).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Groves P. Fabrication and characterization of ferroelectric perovskite lead indium niobate // *Ferroelectrics*. 1985. Vol. 65, No. 1. P. 61–77.
- 2 Kania A. Crystallographic and dielectric properties of flux grown  $PbB'_{1/2}B''_{1/2}O_3$  ( $B'B''$ : InNb, InTa, YbNb, YbTa and MgW) single crystals // *J. Cryst. Growth*. 2008. Vol. 310, No. 11. P. 2767–2773.
- 3 Yasuda N., Imamura S. Preparation and characterization of perovskite lead indium tantalate // *Ferroelectrics*. 1992. Vol. 126, No. 1. P. 109–114.
- 4 Yasuda N., Inagaki H., Imamura S. Dielectric properties of perovskite lead indium niobate and tantalate prepared by fast firing technique // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 31, No. 5. Art. L574.
- 5 Auslender V. L., Bochkarev I. G., Boldyrev V. V., Lyaikhov N. Z., Voronin A. P. Electron beam induced diffusion controlled reaction in solids // *Solid State Ionics*. 1997. Vol. 101–103, Part 1. P. 489–493.
- 6 Lysenko E. N., Vlasov V. A., Nikolaev E. V., Surzhikov A. P., Korobeynikov M. V. Microstructure and magnetization study of Li and Li–Zn ferrites synthesized by an electron beam // *Mater. Chem. Phys.* 2023. Vol. 302. Art. 127722.
- 7 Ancharova U. V., Mikhailenko M. A., Tolochko B. P., Lyaikhov N. Z., Korobeinikov M. V., Bryazgin A. A., Bezuglov V. V., Shtarklev E. A., Vlasov A. Yu., Vinokurov Z. S. Synthesis and staging of the phase formation for strontium ferrites in thermal and radiation-thermal reactions // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 81. Art. 012122.
- 8 Пат. SU 975068 A1, 1982.
- 9 Пат. SU 1375328 A1, 1988.