

УДК: 621.318.1:548.53.

ЮҚОРИ ДИЭЛЕКТРИК КИРИТУВЧАНЛИ МАТЕРИАЛ

Пайзуллаханов Мухаммаде-Султанхан Саидивалиханович,

фан доктори (DSc), лаборатория мудири;

Шерматов Жавохир Зафарович,

кичик илмий ходим;

Ражамамов Отабек Тулаббоевич,

кичик илмий ходим;

Нодирматов Эркин Закирматович,

кичик илмий ходим

ЎзР ФА «Физика-Қуёш» ИИЧБ Материалшунослик институти

Аннотация. Ушбу мақолада сегнетоэлектриклар материалишунослигининг фундаментал муаммоларини ўрганиш натижалари келтирилган. Адабиётлар маълумотларини кўриб чиқиш натижа-сида муаммонинг тегишли томонлари – сегнетоэлектрик материалларнинг физик хусусиятларини шакллантиришни тартибга солувчи қонунлари ва ташқи таъсирлардан фойдаланиб, бу хусусиятлар-ни бошқариш имкониятлари аниқланди. Тадқиқот объекти юқори зичликдаги қуёш нурлари оқимида синтез қилинган барий ва стронций титанатлар эди. Барий титанати қиздирилган жисмларнинг нурланишини ҳисоблаш асосида компонентлар ва реакция маҳсулоти эриш нуқталарига мос келадиган концентрацияланган қуёш нурланишининг зичлигида қуёш печида эритилди. Юқори зичликдаги кон-центрацияланган қуёш нурлари таъсири остида қуёш печида эриганида, оксиди зарралари титанат доналарини сиқиб чиқариши ва уларнинг ўсишига тўсқинлик қилиши натижасида кичик дон ҳажмига эга бўлган микроструктура олиш мумкинлиги кўрсатилган. Нозик дисперсия тикланиш жараёнини тезлаштиради, шунингдек? яхшилانган диэлектрик хусусиятларга эга бўлган зичроқ микротузилмани шакллантиришга ёрдам беради.

Таянч тушунчалар: титанат материал, қуёш сандони, структура деффектлари, диэлектрик ки-ритувчанлик.

МАТЕРИАЛ С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Пайзуллаханов Мухаммаде-Султанхан Саидивалиханович,

доктор наук (DSc), заведующий лабораторией;

Шерматов Жавохир Зафарович,

младший научный сотрудник;

Ражамамов Отабек Тулаббоевич,

младший научный сотрудник;

Нодирматов Эркин Закирматович,

младший научный сотрудник

Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце»

Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. В работе приводятся результаты исследований фундаментальной проблемы материаловедения сегнетоэлектриков. Из обзора литературных данных выявлена актуальная задача – определение закономерностей формирования физических свойств сегнетоэлектрических материалов и возможности управления этими свойствами с помощью внешних воздействий. Объектами исследования выбраны титанаты бария и стронция, синтезированные в потоке концентрированного солнечного излучения высокой плотности. Плавление титаната бария на солнечной печи проводили при плотностях концентрированного солнечного излучения, соответствующих температурам плавления компонентов и продукта реакции, из расчета излучения нагретых тел. Показано, что при плавлении на солнечной печи под воздействием концентрированного солнечного излучения высокой плотности можно получить микроструктуру с малым размером зерна в результате того, что частицы оксида обволакивают зерна титаната и препятствуют их росту в ходе технологического процесса. Мелкодисперсность ускоряет процесс восстановления, а также способствует образованию более плотной микроструктуры с повышенными диэлектрическими свойствами.

Ключевые слова: материал титаната, солнечная печь, дефекты структуры, диэлектрическая проницаемость.

MATERIAL WITH HIGH DIELECTRIC PERMITTIVITY

Payzullahanov Muhammad-Sultanhan Saidivalikhanovich,

Doctor of Science (DSc), Head of Laboratory;

Shermatov Zhavokhir Zafarovich,

Junior research associate;

Razhamatov Otabek Tulabboevich,

Junior research associate;

Nodirmatov Erkin Zakirmatovich,

Junior research associate

Institute of Materials Science NPO «Physics-Sun» AN RUz

Abstract. The paper presents the results of studies of the fundamental problem of materials science of ferroelectrics. Based on the literature review the relevant aspects of the problem – determining the laws governing the formation of the physical properties of ferroelectric materials and the possibility of controlling these properties using external influences have been identified. The object of the study is barium and strontium titanates synthesized in a stream of high-density concentrated solar radiation. Barium titanate was melted in a solar furnace at densities of concentrated solar radiation corresponding to the melting points of the components and the reaction product, based on the calculation of the radiation of heated bodies. It is shown that when melting on a solar furnace under the influence of concentrated solar radiation of high density, it is possible to obtain a microstructure with a small grain size due to the fact that the oxide particles envelop the titanate grains and inhibit their growth during the process. Fine dispersion accelerates the recovery process and contributes to the formation of a denser microstructure with improved dielectric properties.

Keywords: titanate material, solar furnace, structural defects, dielectric constant.

Введение

Разработка высокоэффективных сегнетоэлектрических материалов и совершенствование технологий их производства непосредственно связаны с решением фундаментальной проблемы материаловедения сегнетоэлектриков – определением закономерностей формирования физических

свойств сегнетоэлектрических материалов и возможностью управления этими свойствами с помощью внешних воздействий. Однако всестороннее исследование процессов взаимодействия концентрированного солнечного потока с веществом еще не выявили при этом физико-химические, а также радиационно- и теплофизические механизмы структурирова-

ния или деструкции целого ряда материалов в поле концентрированного солнечного излучения. Также вызывает большой практический интерес не только возможность получения, но и прогнозирования создания новых перспективных материалов с высокими техническими характеристиками, синтезируемых по специальной технологии, посредством управления оптико-энергетическими параметрами солнечной печи.

Синтез в потоке концентрированного солнечного излучения оказывает наиболее сильное влияние на дефектную структуру структурируемого материала, тем самым способствуя появлению возможности контроля степени дефектности варьированием технологических параметров лучистого нагрева. Безынерционность концентрированного солнечного излучения и уникальность его спектра, а также присущие минимальные градиенты температуры вызывают микропроцессы кристаллизации с образованием наноразмерных структур, играющих особую роль при формировании свойств продукта, получаемого посредством направленного синтеза с применением методов сверхбыстрой закалки (103–105 град/с) и отжига. Реализовав технологические условия, можно получить материалы, обладающие высокими показателями теплопроводности, лучепоглощения, селективности.

Как известно, в приборостроении применяют установочные, конденсаторные и пористые керамические материалы. В зависимости от характера задач используют электрофарфор, пирогиллит, радиофарфор, керамит и ультрафарфор.

Анализ показал, что конденсаторная керамика должна иметь большую диэлектрическую проницаемость (ϵ), обеспечивающую повышенную удельную емкость, низкие потери. Применение такой керамики увеличивает надежность работы и теплостойкость конденсаторов, уменьшает их размеры.

Кроме того, конденсаторная керамика отличается небольшим содержанием бесщелочной аморфной фазы и применяется для изготовления конденсаторов высокого и низкого напряжения. Основной массой в составе конденсаторной керамики являются двуокись ти-

тана и титанаты щелочноземельных материалов Ca, Ba, Mg с небольшим количеством двуокиси циркония и глины.

Как следует из анализа результатов предыдущих работ [1-5], сегнетоэлектрическая керамика на основе титанатов бария и стронция отличается повышенной диэлектрической проницаемостью (от 6 до 3000) и определенной ее зависимостью от температуры (ТКЕ). При использовании добавок, например, оксида железа, диэлектрическая проницаемость титаната бария может повышаться до 10000. При этом наблюдается также размытый сегнетоэлектрический фазовый переход, что приводит к сглаживанию температурной зависимости диэлектрической проницаемости.

Разработка высокочастотной конденсаторной керамики основывается на материалах на базе смеси двуокиси титана и двуокиси циркония. Такой материал имеет малый температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, поэтому конденсаторы из них стабильны.

Основными тенденциями в развитии микроэлектроники являются миниатюризация и увеличение быстродействия различных устройств. Для запоминающих устройств, вроде динамической и статической оперативной памяти, основанных на емкостных компонентах (конденсаторах), это означает, что при уменьшении размеров конденсатора величина его емкости должна оставаться прежней.

Целью исследования является разработка технологии получения конденсаторной керамики на основе титанатов бария и стронция, синтезированных на солнечной печи.

Обзорная часть. Важным достоинством керамики является высокая доступность сырья, в том числе для получения бескислородной керамики типа карбидов и нитридов кремния, циркония или алюминия, заменяющих дефицитные металлы. Производство керамики, как правило, не загрязняет окружающую среду в такой мере, как металлургия, а сами керамические материалы позволяют принимать экологически оправданные технологические и технические решения. Получение керамики обычно более безопасно, чем производство альтернативных металлических материалов (благодаря отсутствию процессов электро-

лиза, пирометаллургии, воздействия агрессивных сред), а керамика со специальными свойствами позволяет создавать эффективные противопожарные системы.

Керамические образцы перовскитов (ABO_3) титаната бария получают стандартным методом твердофазных реакций [1-8]. Кинетика образования при твердофазном синтезе новых структур определяется: коэффициентами диффузии атомов и их зависимостью от температуры, образованием в реакционной зоне фаз постоянного и переменного состава и т.д. К сожалению, несмотря на исследования физико-химических процессов образования оксидных перовскитов, до настоящего времени не проведена теоретическая оценка необходимой совокупности термодинамических параметров для успешного синтеза перовскитов любого задаваемого состава. Большинство сложнооксидных материалов получают по твердофазной технологии в реакциях типа оксид-оксид, оксид-гидроксид или оксид-углекислоты [9].

Керамику BaTiO_3 получают обычно путем спекания при высокой температуре 1573–1673 К эквимолекулярной смеси BaCO_3 и TiO_2 . При этом происходит следующая реакция:



Более подробное описание режима синтеза приведено в работах [10-14].

В таблице 1 приведены структурные параметры перовскитовых фаз BaTiO_3 , образующихся после отжигов при разных температурах. Можно видеть, что низкотемпературный отжиг BaTiO_3 (до 923 К) гель-смеси приводит к образованию кубической фазы. При этом с повышением температуры отжига при комнатной температуре уменьшается значение пара-

метра ячейки. Отжиг в интервале температур $1023 \text{ K} < T_{\text{отж}} < 1473 \text{ K}$ приводит к существованию при комнатной температуре тетрагональной фазы BaTiO_3 с увеличением спонтанной деформации (тетрагональное искажение) при увеличении $T_{\text{отж}}$, проявляя пьезоэлектрический эффект [15-21].

Вышеприведенный анализ показывает, что синтез из газовой фазы основан на конденсации или химических реакциях компонентов газовой фазы, золь-гель синтез в водных растворах – на химических реакциях обмена, разложения, кристаллизации, а твердофазные реакции – на диффузии на границах раздела. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, но ни один из них не является универсальным.

Поэтому одной из актуальных задач материаловедения, и в частности синтеза сегнето-керамики, является исследование процессов синтеза из состояния расплава, полученного воздействием концентрированного солнечного излучения. Расплав – это состояние вещества при температурах, близких температуре плавления. В отличие от обычных жидкостей структура расплавов содержит кристаллоподобные группировки – ассоциации, микрокристаллиты, строение которых связано со строением кристаллической фазы.

Технология синтеза из расплава основана на процессах, протекающих по следующей схеме: брикетирование исходной смеси – плавление на солнечной печи – закалка со скоростью $10^4 - 10^5$ град/с – измельчение – спекание. Материал, полученный по такой схеме, проявит повышенные механические и диэлектрические свойства по сравнению с теми, которые получены стандартными физико-химическими и керамическими методами [22-26].

Таблица 1

Структурные параметры перовскитовых фаз BaTiO_3 , образующихся после отжигов при разных температурах

Марка материала	Диэлектрическая проницаемость	Точка Кюри, °С	Коэффициент электро-механической связи
ТБ-1	1500 ± 300	110	0,20
ТБК-3	1200 ± 200	95	0,2
ТБКС	450 ± 50	150	0,17

Известно большое число физических методов гомогенизации (главными из которых в технологии керамических материалов являются диспергирование и смешивание компонентов в мельницах различного типа). Однако наиболее эффективными являются методы химической гомогенизации в виде солей или гидроксидов (соосаждение, криохимический синтез, алкоксотехнология и др.). Химическая гомогенизация растворимых соединений металлов переводением их в водный или неводный раствор является одним из самых универсальных методов получения однородных солевых прекурсоров, так как в данном случае достигается практически статистическое распределение катионов. Однако в дальнейшем, при извлечении твердого вещества из раствора, возникают сложности, связанные с неполным или неодновременным осаждением отдельных компонентов, различными скоростями кристаллизации веществ и пр. При использовании синтеза из расплава в большинстве случаев удастся значительно снизить негативное влияние этих процессов на получение однородного по составу конечного продукта.

Основная часть

Плавление титаната бария на Большой солнечной печи (БСП) проводили при плотностях концентрированного солнечного излучения (КСИ), соответствующих температурам плавления компонентов и продукта реакции, из расчета излучения нагретых тел по формуле Стефана – Больцмана:

$$Q = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (2)$$

где ε – степень черноты материала, σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана $5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$, T – температура, К.

Для оценки эффекта воздействия концентрированного солнечного излучения в качестве контрольных использовали образцы, приготовленные из стехиометрической смеси исходных компонентов, спеченные в электрической печи при температуре 1300°C , с последующим охлаждением со скоростью $100^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Образцы-таблетки устанавливались на фокальную плоскость Малой солнечной печи и расплавлялись в потоке КСИ. Отливки охлаждали в воде (закалкой) (А-типа образцы), а также на воздухе (В-типа образцы).

Согласно фазовой диаграмме $\text{TiO}_2 - \text{BaCO}_3$, смесь оксида титана и карбоната бария, соответствующая наиболее близкой к стехиометрии (молярное отношение) $\text{BaCO}_3 : \text{TiO}_2 = 1:1$, позволяет синтезировать титанат бария перовскитовой структуры BaTiO_3 .

В данной работе в качестве сырья для синтеза титана бария нами использованы оксид титана и карбонат бария. Смесь таких сырьевых материалов в определенном соотношении измельчали до тонины 063. Изготовлены образцы в виде таблеток ($\varnothing 24 \text{ мм}$, толщиной 12 мм) прессованием на пресующей установке СТ 100.

Для получения расплавов такой смеси образцы устанавливали на фокус БСП на спе-

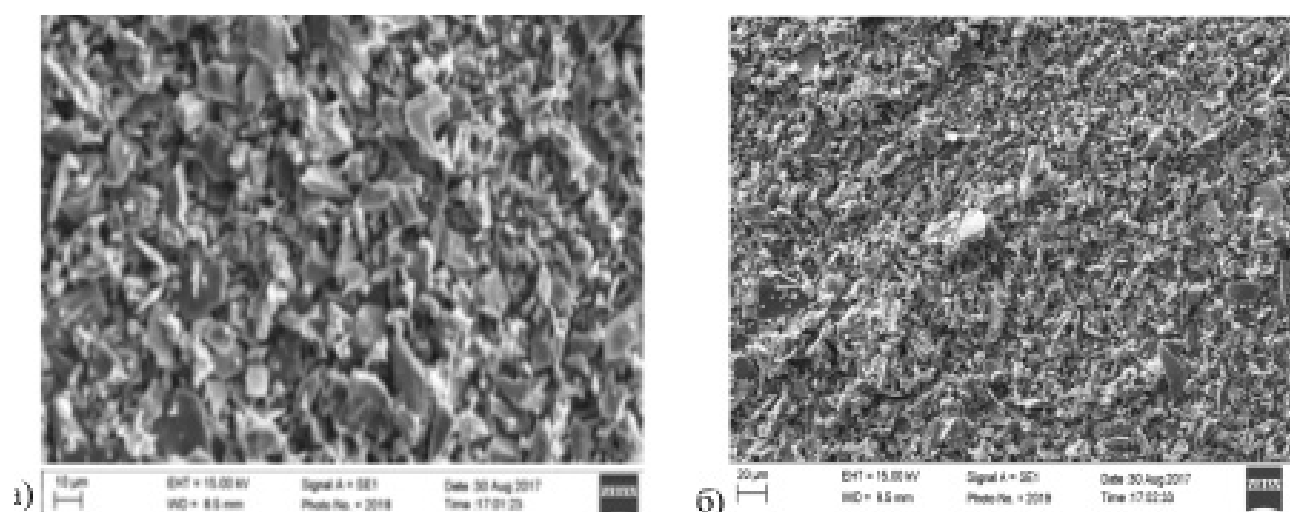


Рис.1. Снимки СЭМ титаната бария, полученного: а) закалкой расплава с плотностью КСИ $300 \text{ Вт}/\text{см}^2$; б) медленным охлаждением расплава

циальных огнеупорных подложках, которые легли на поверхности водоохлаждаемой поверхности печи роторного типа. Плотность потока КСИ варьировали в пределах 100-300 Вт/см².

Расплав охлаждали в первом случае методом слива каплей в проточную воду. Полученный материал обозначали А-типом. Во втором случае расплав был охлажден в условиях отключения потока КСИ на поверхности водоохлаждаемой подложки. Такой материал обозначен Б-типом.

На рисунке 1 приведен снимок, созданный на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), титаната бария, полученного закалкой (вохл.~103 град/с) расплава с плотностью КСИ 300 Вт/см². Микроструктура такого материала характеризуется наличием частиц произвольной формы с размерами от 0,3 до 3 мкм. В то же время медленное охлаждение расплава (вохл.~102 град/с) способствует кристаллизации и укрупнению зерен (10÷50 мкм).

На рисунке 2 приведены рентгенограммы образцов титаната бария. Образцы А-типа получены закалкой расплава в воду (вохл.~103 град/с), В-типа – медленным охлаждением расплава на воздухе (вохл.~102 град/с). Анализ показал, что в случае закаленного образца (рис. 4.2 а) дифракционная картина обнаруживает лишь фоновое рассеяние без выраженных

максимумов и соответствует аморфному состоянию вещества. Отливоч, полученный охлаждением расплава на воздухе, успевает кристаллизироваться. Структура представлена кубической решеткой BaTiO₃, а= 3,99 Å.

Рентгенограмма образца титаната бария В-типа описывалась дифракцией тетрагональной решетки титаната бария с параметрами решетки а=3,99 Å, с=4,02 Å. Такие данные соответствовали степени тетрагональности δ=с/а-1=0,010. Тетрагональное искажение обусловлено деформацией решетки на границах зерен.

Деформация кристаллической решетки, вызванная микронапряжениями, возникающими в потоке КСИ, может быть определена по рентгенограмме материала по степени смещения линий дифракционных отражений по сравнению с табличными данными. Дифференцируя уравнение Вульфа – Брегга:

$$2d_0 \sin \theta_0 = n\lambda, \quad (3)$$

где d_0 и θ_0 – соответственно межплоскостное расстояние и угол отражения материалом без микронапряжений, получим:

$$\Delta d \sin \theta_0 + d_0 \cos \theta_0 \Delta \theta = 0 \quad (4)$$

Из этого выражения получим:

$$\varepsilon = \Delta d / d_0 = -\operatorname{ctg} \theta_0 \Delta \theta \quad (5)$$

Анализ показывает, что воздействие КСИ вызывает деформацию элементарной ячейки титаната бария до 16% по сравнению с материалом, полученным твердофазным синтезом.

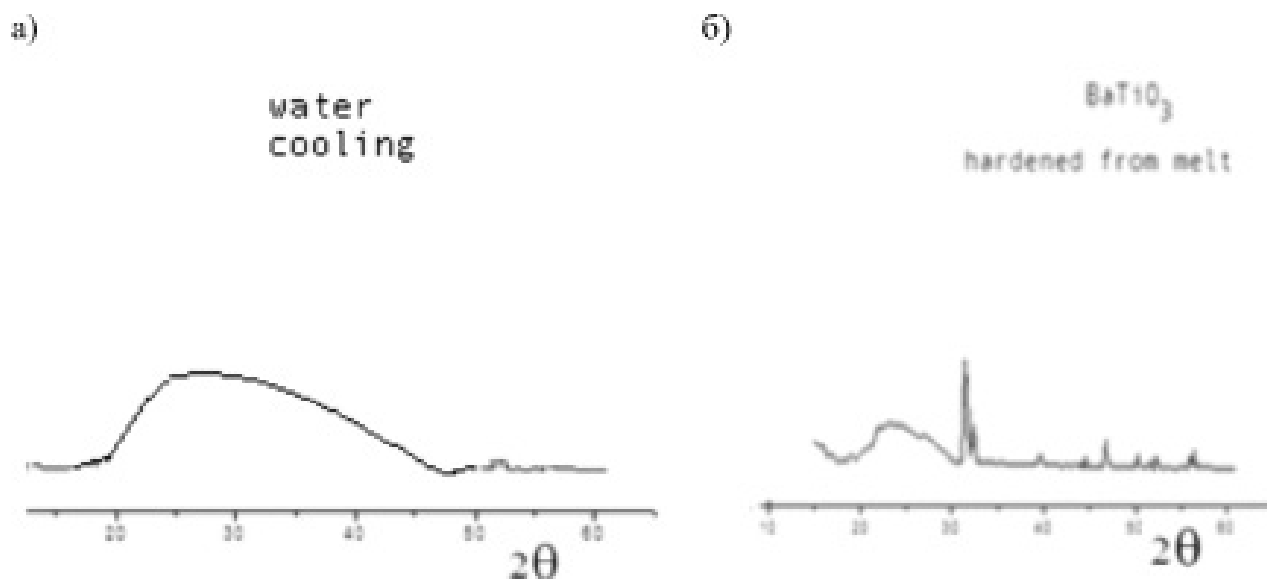


Рис.2. Рентгенограммы образцов титаната бария, полученных: а) закалкой расплава в воду (вохл.~103 град/с) – А-типа; б) медленным охлаждением расплава на воздухе (вохл.~102 град/с) – В-типа

Отливки, полученные после охлаждения плавного материала, молили до тонины 063. Из измельченного порошка методом прессования изготовлены образцы ($\varnothing$ 8 мм, толщиной 2 мм) на прессующей установке СТ-100. Образцы обжигали в электрической печи с силитовыми нагревателями при температуре 1350 °С. Продолжительность обжига составляла 2 часа. Охлаждение осуществляли со скоростью примерно 100 град/мин. Полученные образцы обозначали через С-тип.

На рисунке 3 приведена рентгенограмма образца титаната бария С-типа. Такая картина описывается дифракцией тетрагональной решетки титаната бария с параметрами решетки $a=3,99 \text{ \AA}$, $c=4,02 \text{ \AA}$, степени тетрагональности $\delta=c/a-1=0,010$, обусловленное деформацией решетки на границах зерен.

На рисунке 4 приведены зависимости среднего размера зерен материалов титаната бария BaTiO_3 от плотности потока концентрированного светового излучения. С ростом плотности потока КСИ наблюдается уменьшение среднего размера зерен материалов титаната бария BaTiO_3 от 250 до 150 мкм.

Для оценки эффекта воздействия КСИ в качестве контрольных использовали образцы, приготовленные методом твердофазного синтеза из стехиометрической смеси исходных компонентов, спеченные при температуре 1300 °С. Продолжительность термообработки составляла 2 часа. Охлаждение производили в печи, отключенной от питания, что соответ-

ствовало скорости охлаждения примерно 100 град/мин. Полученные образцы обозначали D-типом.

Рентгенограмма образца D-типа была подобна рентгенограмме образца С-типа, но с меньшим по сравнению с образцом С-типа тетрагональным искажением $\delta=c/a-1=0,007$. Это указывает на то, что кристаллическая решетка материала, полученного твердофазным синтезом при 1300 °С также деформирована, но в меньшей степени, чем в случае образца С-типа, и степень деформации зависит от размера зерен.

Повышение степени тетрагональности решетки в образцах С-типа обусловлено как малым размером зерен, так и частичным восстановлением иона $\text{Ti}^{4+}(0,067)$ до $\text{Ti}^{3+}(0,042)$ при высоких плотностях потока излучения, вызывающим большую деформацию решетки.

Данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что размер кристаллитов зависит от скорости охлаждения расплава. Охлаждение расплава на воздухе стимулирует кристаллизацию из аморфного состояния согласно структурному упорядочению, снимается деформация. Аморфная прослойка между кристаллитами способствует эластичной упаковке кристаллитов, сцепляет их за счет сил поверхностного натяжения. Расчеты показали, что степени кристалличности образцов А-, В-, С-типа составляли 5, 28, 75% соответственно. В случае образцов D-типа степени кристалличности составляет 94%.

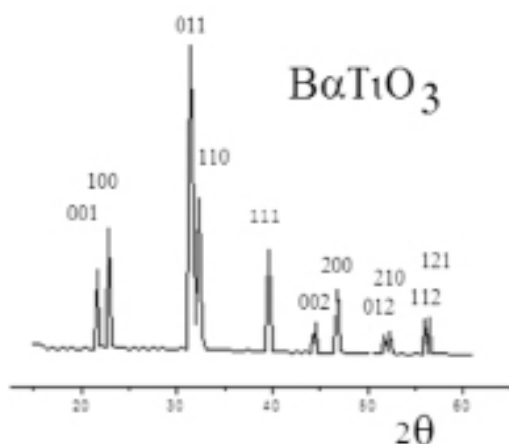


Рис. 3. Рентгенограмма образца титаната бария С-типа

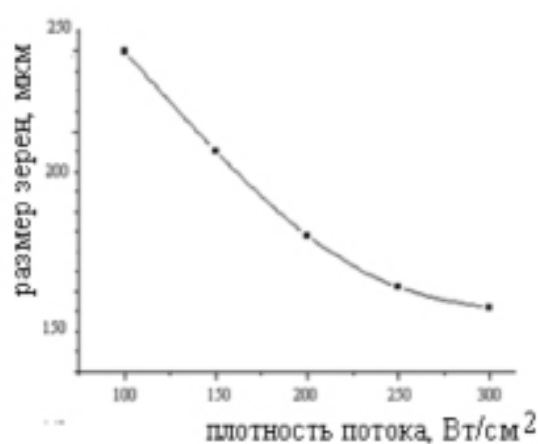
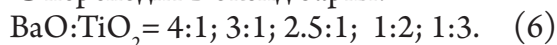


Рис. 4. Зависимость размера зерен BaTiO_3 от плотности потока излучения

Далее авторами исследованы различные составы в системе $\text{TiO}_2 + \text{BaCO}_3$. Получены составы со следующей стехиометрии, из расчета, что карбонат бария при температурах выше 800°C переходит в оксид бария:



Технология приготовления образцов включала следующие операции:

- 1) приготовление смеси оксида титана с карбонатом бария;
- 2) измельчение (мокрое) смеси в барабанной мешалке;
- 3) сушка при 450°C в сушильном шкафу;
- 4) прессование на установке СТ-100 под давлением 1 т;
- 5) плавка на БСП при плотности потока 300 Вт/см^2 ;
- 6) закалка расплавов методом слива в воду, что соответствовало скорости охлаждения 103 град/с .

На отливках, полученных закалкой расплава, проводились измерения диэлектрической проницаемости.

На рисунке 5 приведены значения диэлектрической проницаемости в зависимости от состава в системе $\text{TiO}_2 + \text{BaCO}_3$. Из рисунка видно, что значения диэлектрической проницаемости образцов материала соответствующего состава в системе $\text{TiO}_2 + \text{BaCO}_3$ сильно отличаются. Так, высокие значения диэлектрической проницаемости наблюдаются для состава со стехиометрией $\text{BaO}:\text{TiO}_2 = 2,5:1$, в то время как составы, богатые оксидом бария

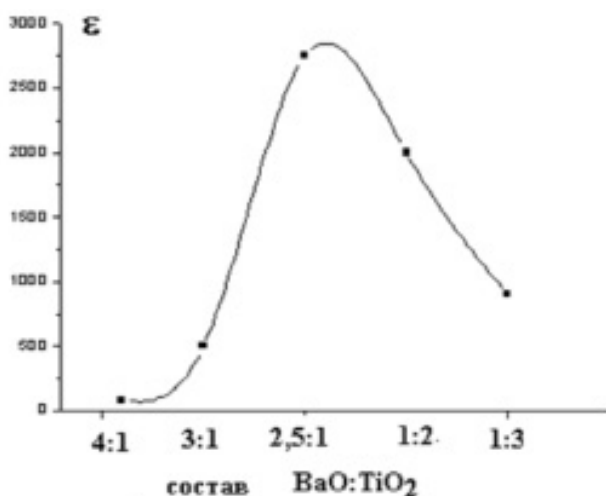


Рис. 5. Значения диэлектрической проницаемости в зависимости от состава в системе $\text{TiO}_2 + \text{BaCO}_3$

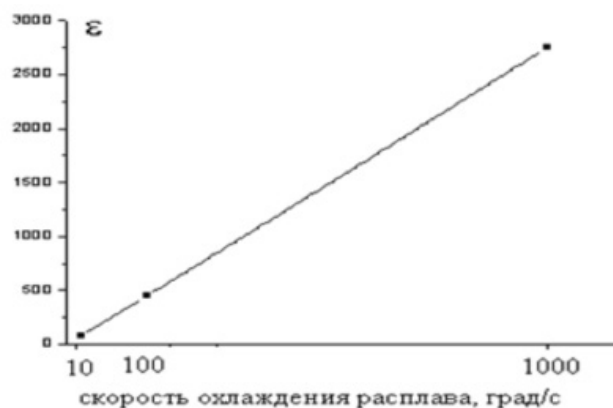


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости от скорости охлаждения расплава

или титана, проявляют пониженные значения диэлектрической проницаемости.

На рисунке 6 приведена зависимость диэлектрической проницаемости от скорости охлаждения расплава. Из рисунка видно, что с ростом скорости охлаждения расплава наблюдается увеличение диэлектрической проницаемости. Самые высокие значения диэлектрической проницаемости приходятся на случай закалки расплава сливом в воду, т.е. при скорости 103 град/с .

В таблице 2 приведены значения кажущейся плотности ($\rho_{\text{каж}}$), пористости (Π), относительной плотности ($\rho_{\text{отн}}$), структурной рыхлости (ω) керамических образцов титаната бария, полученных плавлением смеси оксида титана с карбонатом бария оптимального стехиометрического состава в зависимости от зернистости компонентов исходной смеси.

Таблица 2
Значения кажущейся плотности ($\rho_{\text{каж}}$), пористости (Π)

Зернистость, мкм	$\rho_{\text{каж}}$ г/см ³	Π , %	ε
<60	5.40	10	2100
<100	5.17	14	2600
<200	4.87	19	2800

Выводы

Отличие структурной рыхлости материалов связано с тем, что предварительная плавка оксидов на солнечной печи способствует синтезу титаната бария с более плотной струк-

турой. Можно предположить, что плавленные оксиды являются более активной формой реагента, вследствие чего спекание плавленного материала происходит более интенсивно по сравнению с исходным материалом.

В отличие от инфракрасного нагрева, когда плавление происходит изнутри материала, при синтезе на солнечной печи наблюдается послойное плавление, обусловленное нагревом вследствие поглощения энергии на дефектах с уровнями внутри запрещенной зоны на границах зерен в слое толщиной λ . Чем мельче

исходное зерно, тем быстрее оно прогревается и плавится при низкой плотности. То есть мелкодисперсность ускоряет процесс восстановления, а также способствует образованию более плотной микроструктуры с повышенными диэлектрическими свойствами [27].

Таким образом, диэлектрическая проницаемость титаната бария зависит от фазового состава конечного продукта, технологических параметров плавления, дисперсности исходного сырья, скорости охлаждения расплава, полученного на БСП.

Источники и литература

1. Гаврилова Л.Я. Методы синтеза и исследование перспективных материалов: Учеб. пособие. – Екатеринбург. Уральский государственный университет им. А.М. Горького, 2008. – 402 с.
2. Громов О.Г., Кузьмин А.П., Кунишина Г.Б., Локишин Э.П., Калинин В.Т. Получение порошкообразного титаната бария // Неорганические материалы, 2006. – Т. 42. – № 2. – С. 212-217.
3. Cheng J.P., Agrawal D.K., Komarneni S., Mathis M., Roy R. Microwave processing of WC-Co composites and ferroic titanates // Mat. Res. Innovat. – 1997. – № 1. – Pp. 44-52.
4. Vaidhyanathan B., Raizada P., Rao K.J. Microwave assisted fast solid state synthesis of niobates and titanates // J. Mater. Science Letters. – 1997. – № 16. – Pp. 2022-2025.
5. Vaidhyanathan B., Anirudh P. Singh, Agrawal D.K. Microwave Effects in Lead Zirconium Titanate Synthesis: Enhanced Kinetics and Changed Mechanisms // J. Am. Ceram. Soc. – 2001. – V. 84. – № 6. – Pp. 1197-1202.
6. Пат. РФ 2571478. Состав композиции для получения сегнетоэлектрического материала титаната бария-стронция, где предложен состав для получения сегнетоэлектрического материала титаната бария-стронция / В.Г. Барышников, Л.П. Ефименко, В.П. Афанасьев.
7. Ким Т.В. Синтез золь-гель методом и свойства титаната бария-стронция-кальция для неохлаждаемых ИК-приемников: Автореф. дисс... канд. техн. наук. 05.27.06. – Минск, 2010. – С. 15.
8. Погибко В.М., Приседский В.В., Сидак И.Л. Исследование механизмов термического распада оксалатного прекурсора титаната бария // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 1. – С. 110-115.
9. Барышников В.Г. Гетерогенные взаимодействия в процессе синтеза титанатов бария и висмута в расплавах солей: Дисс... канд. хим. наук. – Санкт-Петербург, 2009. – 150 с.
10. Иванов К.В. Жидкофазный синтез ацетато-, оксалато- и гидроксотитанилов некоторых п-элементов, физико-химические характеристики их термических превращений и электрореологические свойства: Дисс... канд. хим. наук. – Иваново, 2011. – 150 с.
11. Шут В.Н., Костомаров С.В. Зависимость свойств порошков титаната бария от режима термообработки титанилоксалата бария // Неорганические материалы. – 2012. – Т. 48. – № 6. – С. 706-712.
12. Чупина С.В., Жабров В.А. Изменение энергетических характеристик поверхности органосиликатных покрытий в процессе формирования // Физ. и хим. стекла. – 2007. – Т. 33. – № 6. – С. 872-883.
13. Иванов К.В., Агафонов А.В., Захаров А.Г. Золь-гель синтез наноразмерных ацетатотитанилов бария, бария-стронция и бария-кальция: термическая эволюция в титанаты // Известия вузов: «Химия и химические технологии», – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 74-78.
14. Агафонов А.В., Иванов К.В., Давыдова О.И., Краев А.С., Трусова Т.А., Захаров А.Г. Жидкофазный синтез солей ацетато- и оксалатотитанила бария как интермедиатов для получения наноразмерного титаната бария // Журн. неорг. химии, – 2011. – Т. 56. – № 7. – С. 1087-1091.
15. Жабров В.А., Ефименко Л.П., Барышников В.Г., Полякова И.Г., Гуменников А.В. Синтез порошков BaTiO_3 разной дисперсности путем обменных реакций в расплавах. / Физ. и хим. стекла. – 2008. – Т. 34. – №1. – С. 116-123.

16. Пат. РФ 2374207, МПК C04B35/475. Состав композиции для получения сегнетоэлектрического материала / В.А. Жабров, Л.П. Ефименко, В.Г. Барышников, В.П. Афанасьев. Опубл. 27.11.2008.
17. Михайлов М.М., Соколовский А.Н. Синтез и свойства соединений BaSrTiO₃ // Доклады ТУСУРа – Дек., 2007. – № 2(16). – С. 198-203.
18. Rout S.K., Panigrahi S. Mechanism of phase formation of BaTiO₃ – SrTiO₃ solid solution through solid oxide reaction // Indian journal of pure and applied physics. – 2006. – V. 44. – Pp. 608-611.
19. Митосериу Л., Тура В. Размер зерновых зависимых термических гистерезисов в керамике титанатов бария // Analele stiintifice ale universitatii «al.i.cuza» din iasi. – Том. XLI-XLII s.I.b.fasc.2 Fizica Solidelor – Fizica Teoretica. – 1998-1999. – Pp. 113-124
20. Джабаров С.Г. Кристаллическая структура титаната бария при воздействии давления и температуры // Успехи физики металлов. – 2015. – Т. 16. – С. 329-352.
21. Payzullahanov M.S. Particularities of the syntheses BaTiO₃ in the field of concentrated light energy // Horizon Research Publishing. – USA Manuscript. ID:16200286. – 2013. – № 27.
22. Пайзуллаханов М.С., Нурматов Ш.Р., Шерматов Ж.З. Титанаты бария и стронция, синтезированные в поле концентрированной световой энергии // Стекло и керамика. – 2013. – № 6. – С. 123-125.
23. Пайзуллаханов М.С., Файзиев Ш.А., Нурматов Ш.Р., Шерматов Ж.З. Особенности синтеза титаната бария в поле концентрированной световой энергии // Гелиотехника, – 2013. – № 4.
24. R.Y.Akbarov, M.S.Paizullakhanov. Characteristic features of the energy modes of a large solar furnace with a capacity of 1000 kW// Applied Solar Energy, v.54. #2. Pp.99-109.(2018)/
25. A.Abdurakhmanov, Sh.Faiziev, R.Akbarov, S.Suleimanov, M.Rumi, M.S Paizullakhanov, E.Nodirmatov. Properties of pyroxene glass ceramics, heat treated in the Big Solar Furnace// Applied Solar Energy, v.45. #1. Pp.45-47. (2009)/
26. Ровин С.В. Влияние дисперсности материалов на скорости процессов твердофазного восстановления // Литье и металлургия, – 2014. – Т. 4. – № 77. – С. 7-9.

Рецензент:

Ашуров Х., доктор технических наук,

директор Института ионно-плазменных и лазерных технологий.