

ИЗУЧИТЬ И ИЗУЧИТЬ СВОЙСТВА БАРИЯ И СТРОНЦИЯ- ТИТАНА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ

Холматов Абдурашид Абдурахим угли

Хайитов Азизбек Мўминжон ўгли

ассистент, Ферганский Политехнический Институт,
Узбекистан, г. Фергана, e-mail: x.xolmatov@ferpi.uz

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты исследований фундаментальной проблемы материаловедения сегнетоэлектриков. Из обзора литературных данных выявлены актуальные стороны задачи – определения 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: титанат материал, солнечная печь, дефекты структуры, диэлектрическая проницаемость.

ABSTRACT

The paper presents the results of research on the fundamental problem of materials science of ferroelectrics. From a review of literature data, the relevant aspects of the problem are identified - determining the regularities of the formation of the physical properties of ferroelectric materials and the possibility of controlling these properties using external influences. The objects of study were titanates of barium and strontium, synthesized in a stream of concentrated solar radiation of high density. Melting of barium titanate in a solar furnace was carried out at densities of concentrated solar radiation corresponding to the melting temperatures of the

components and the reaction product, based on the radiation of heated bodies. It is shown that when melting in 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 as a result of the fact that oxide particles envelop the titanate grains and prevent their growth during the technological process. fine dispersion accelerates the recovery process, and also contributes to the formation of a denser microstructure with increased dielectric properties.

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

ВВЕДЕНИЕ

Разработка высокоэффективных сегнетоэлектрических материалов и совершенствование технологий их производства непосредственно связано с решением фундаментальной проблемы материаловедения сегнетоэлектриков – определения закономерностей формирования физических свойств сегнетоэлектрических материалов и возможности 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 структурирования или деструкции целого ряда материалов в поле концентрированного солнечного излучения еще не изучены. Также вызывает большой практический интерес не только возможность получения, но и прогнозирования, создание новых перспективных материалов с высокими техническими характеристиками синтезируемые 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 появится возможность контролирования степени дефектности варьированием технологических параметров лучистого нагрева. Безинерционность 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 ($10^3 - 10^5$ град\с) и отжига. Реализовав технологические условия можно

получить материалы, обладающие высокими показателями теплопроводности, лучепоглощения, селективностью.

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

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ показывает, 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 титана и титанаты щелочноземельных материалов Ca, Ba, Mg с небольшим количеством двуокиси циркония и глины.

Как следует из анализа результатов предыдущих [1-5] работ 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 размытые сегнетоэлектрического фазового перехода, что приводит к сглаживанию температурной зависимости диэлектрической проницаемости.

При разработке высокочастотной конденсаторной керамики основываются на материалы на базе смеси двуокиси титана и двуокиси циркония. Такой материал имеет малый температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, поэтому конденсаторы из них стабильны.

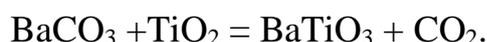
Основной тенденцией в развитии микроэлектроники является миниатюризация и увеличение быстродействия различных устройств. Для запоминающих устройств вроде динамической и статической оперативной памяти, основанных на емкостных компонентах (конденсаторах), это означает, что при уменьшении размеров конденсатора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

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

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

Керамические образцы перовскитов (ABO_3) титаната бария получают стандартным методом твёрдофазных реакции [1-8]. Кинетика образования при твёрдофазном 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 проведены теоретические оценки необходимой совокупности термодинамических параметров для успешного синтеза перовскитов любого задаваемого состава. Большинство сложнооксидных материалов получают по твёрдофазной технологии в реакциях типа оксид–оксид, оксид–гидроксид или оксид–углекислоты [9].

Керамику $BaTiO_3$ получают обычно путём 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 [10–15].

Таблица 1.

Структурные параметры перовскитовых фаз $BaTiO_3$, образующихся после отжига при разных температурах.

Марка материала	Диэлектрическая проницаемость	Точка Кюри, °С	Коэффициент электромеханической связи
ТБ-1	1500±300	110	0,20

ТБК -3	1200±200	95	0,2
ТБКС	450±50	150	0,17

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. Причём с повышением температуры отжига при комнатной температуре уменьшается значение параметра a ячейки. Отжиг в интервале температур $1023 \text{ К} < T_{\text{отж}} < 1473 \text{ К}$ приводит к существованию при комнатной температуре тетрагональной фазы BaTiO_3 с увеличением спонтанной деформации (тетрагональное искажение) при увеличении $T_{\text{отж}}$ проявляя пьезоэлектрический эффект [16-22].

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; Твердофазные реакции – диффузия на границах раздела;

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, но ни один из них не является универсальным.

Поэтому одним из актуальных задач материаловедения и в частности синтеза сегнетокерамики является исследование процессов синтеза из состояния расплава, полученного воздействием концентрированного солнечного излучения. Расплавы — это состояние вещества при температурах близких температуре плавления.

В отличие от обычных жидкостей структура расплавов содержит кристалл подобные 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 таковыми, полученные стандартными физико-химическими и керамическими методами [23-27].

Известно большое число физических методов гомогенизации (главным из которых в технологии керамических материалов является 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 другие). 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 удается значительно снизить негативное влияние этих процессов на получение однородного по составу конечного продукта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.

Плавление титаната бария на БСП проводили при плотностях концентрированного солнечного излучения (КСИ), соответствующих температурам плавления компонентов и продукта реакции, из расчета излучения нагретых тел – формулы Степана Больцмана

$$Q = \varepsilon \sigma_0 T^4$$

где ε – степень черноты материала, σ_0 – постоянная Степана-Больцмана $5,67 \times 10^{-8}$ Вт/см²К, 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 °С/мин.

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

Согласно фазовой диаграмме TiO₂–BaCO₃ смесь оксида титана и карбоната бария, соответствующая наиболее близкой к стехиометрии (мольное отношение) BaCO₃:TiO₂ = 1:1, позволяет синтезировать титанат бария перовскитовой структуры BaTiO₃.

В данной работе в качестве сырья для синтеза титаната бария нами использованы оксид титана и карбонат бария. Смесь таких сырьевых материалов в определенном соотношении содержаний измельчали до тонины 063. Изготовлены образцы в виде таблеток (Ø24мм, толщиной 12 мм) прессованием на пресующей установке СТ 100.

Для получения расплавов такой смеси образцы устанавливали на фокус БСП на специальных 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 капель в проточную воду. Полученный материал обозначали через А-типа. Во втором случае расплав был охлажден в условиях отключения потока КСИ на поверхности водоохлаждаемой подложки. Такой материал обозначен через Б-типа.

На рис.1 приведен снимок, полученный на сканирующем электронном микроскопе титаната бария, полученного закалкой ($v_{\text{охл.}} \sim 10^3$ град/с) расплава с плотностью КСИ 300 Вт/см². Микроструктура такого материал характеризуется наличием частиц произвольной формы с размерами от 0,3 до 3 мкм. В то время как медленное охлаждение расплава ($v_{\text{охл.}} \sim 10^2$ град/с) способствует кристаллизацию и укрупнению зерен (10÷50 мкм).

На рис.2 приведены рентгенограммы образцов титаната бария, полученных закалкой расплава в воду ($v_{\text{охл.}} \sim 10^3$ град/с) - А-типа, и медленным охлаждением расплава на воздухе ($v_{\text{охл.}} \sim 10^2$ град/с) В-типа. 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. Отливки полученные охлаждением расплава на воздухе успевают кристаллизоваться. Структура представлена кубической решеткой BaTiO_3 $a = 3,99 \text{ \AA}$.

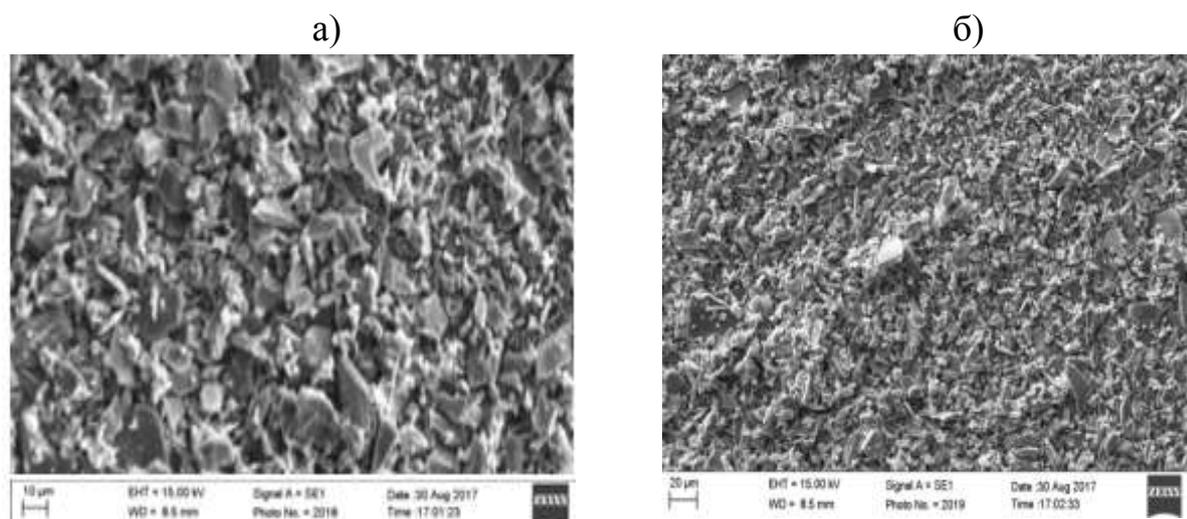


Рис.1. Снимки СЭМ титаната бария полученного:

а) закалкой расплава с плотностью КСИ 300 Вт/см². б) медленным охлаждением расплава.

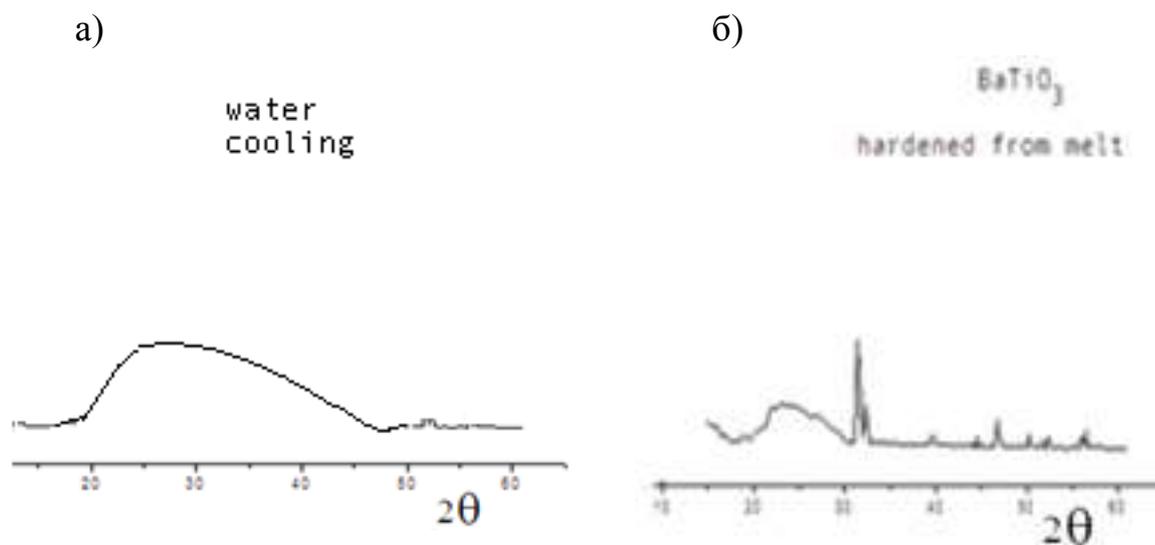


Рис.2. Рентгенограммы образцов титаната бария, полученных а)- закалкой расплава в воду ($v_{\text{охл.}} \sim 10^3$ град/с) – А-типа, б)- медленным охлаждением расплава на воздухе ($v_{\text{охл.}} \sim 10^2$ град/с) – В-типа

Рентгенограмма В-типа образца титаната бария описывалась дифракцией тетрагональной решетки титаната бария с параметрами решетки $a = 3,99 \text{ \AA}$, $c = 4,02 \text{ \AA}$. Такие данные соответствовали о степени тетрагональности $\delta = c/a - 1 = 0,010$. Тетрагональное искажение обусловлено с деформацией решетки на границах зерен.

Деформация кристаллической решетки, вызванной 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

$$2d_0 \sin \theta_0 = n\lambda$$

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

$$\Delta d \sin \theta_0 + d_0 \cos \theta_0 \Delta \theta = 0.$$

Из этого выражения получим $\varepsilon = \Delta d / d_0 = -\text{ctg} \theta_0 \Delta \theta$

Анализ показывает, что воздействие КСИ вызывает деформацию элементарной ячейки титаната бария до 16% по сравнению с материалом, полученным твердофазным синтезом. Отливки, полученные после охлаждения плавленного материала, молоты до тонины 063. Из измельченного порошка методом прессования изготовлены образцы ($\varnothing 8$ мм, толщиной 2 мм) прессованием на пресующей установке СТ 100. Образцы обжигали в

электрической печи с силовыми нагревателями при температуре 1350⁰С. Продолжительность обжига составляла 2 часа. Охлаждение осуществили скоростью примерно 100град/мин. Полученные образцы обозначали через С-типа.

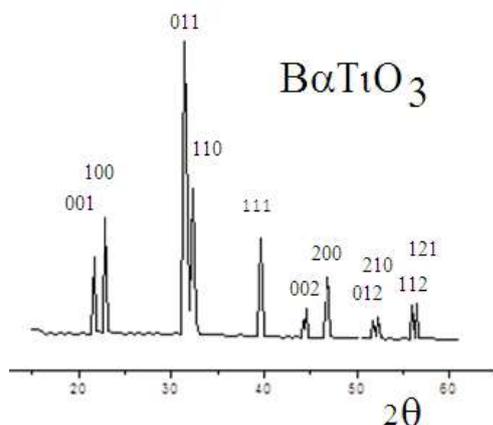


Рис.3. Рентгенограмма С-типа образца титаната бария.

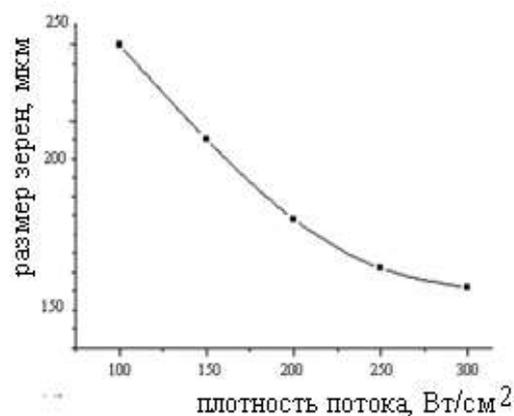


Рис.4. Зависимость размера зерен BaTiO₃ от плотности потока излучения

На рис.3 приведена рентгенограмма С-типа образца титаната бария. 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 с деформацией решетки на границах зерен.

На рис.4 приведены зависимости среднего размера зерен материалов титаната бария BaTiO₃ от плотности потока концентрированного светового излучения.

С ростом плотности потока КСИ наблюдается уменьшение среднего размера зерен материалов титаната бария BaTiO₃ 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 1300⁰С. Продолжительность термообработки составляла 2 ч. Охлаждение производили в печи отключенной от питания, что соответствовало скорости охлаждения примерно 100 град/мин. Полученные образцы обозначали через D-типа.

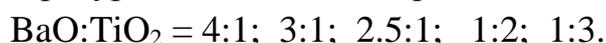
Рентгенограмма D-типа образца была подобна рентгенограмме С-типа образца, но с меньшим по сравнению с С-типа образцом тетрагональным искажением $\delta=c/a-1=0,007$. Это указывает на то, что кристаллическая решетка

материала, полученного твердофазным синтезом при 1300⁰С также деформирована, но в меньшей степени, чем в случае С-типа образца и степень деформации зависит от размера зерен.

Повышение степени тетрагональности решетки в С-типа образцах обусловлено как малым размером зерен, так и частичным восстановлением иона Ti⁴⁺(0,067) до Ti³⁺(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 А-, В-, С-типа образцов составляли 5, 28, 75 % соответственно. В случае D-типа образцов степени кристалличности составляет 94%.

Далее нами исследованы различные составы в системе TiO₂ + BaCO₃. А именно нами получены составы со следующей стехиометрии из расчета, что карбонат бария при температурах выше 800⁰С 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 450⁰С в сушильном шкафу.
4. Прессование на установке С-100 под давлением 1 т.
5. Плавка на БСП при плотности потока 300 Вт/см².
6. Закалка расплавов методом слива в воду, что соответствовало скорости охлаждения 10³ град/с.

На отливках полученных закалкой расплава проводились измерения диэлектрической проницаемости.

На рис.5 приведены значения диэлектрической проницаемости в зависимости от состава в системе TiO₂ + BaCO₃

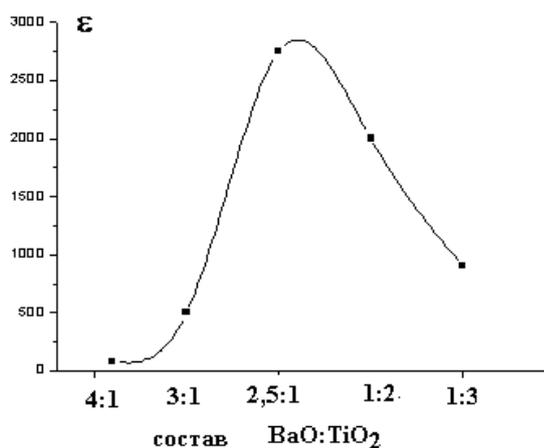


Рис.5. Значения диэлектрической проницаемости в зависимости от состава в системе TiO₂ + BaCO₃

Из рис.5 видно, что значения диэлектрической проницаемости образцов материала, соответствующего состава в системе TiO₂ + BaCO₃ сильно отличаются. Так высокие значения диэлектрической проницаемости наблюдаются для состава со стехиометрией BaO:TiO₂ = 2,5:1. В то время как составы богатые оксидом бария или титана проявляют пониженные значения диэлектрической проницаемости.

На рис.6 приведена зависимость диэлектрической проницаемости от скорости охлаждения расплава.



Рис.6. Зависимость диэлектрической проницаемости от скорости охлаждения расплава

Из рис.6 видно, что с ростом скорости охлаждения расплава наблюдается увеличение диэлектрической проницаемости. Самые высокие значения

диэлектрической проницаемости приходится на случай закалки расплава сливом в воду, т.е. на скорость 10^3 град/с.

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

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличие структурной рыхлости материалов, связано с тем, что предварительная плавка оксидов на солнечной печи способствует синтезу титаната бария с более плотной структурой. Можно предположить, что плавленные оксиды являются более активной формой реагента, вследствие чего спекание плавленого материала происходит более интенсивно по сравнению с исходным материалом.

В отличие от ИК 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 [28].

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

REFERENCES

1. Гаврилова Л.Я. Методы синтеза и исследование перспективных материалов. Учебное пособие. Екатеринбург. «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» 2008, 402с.
2. Громов О.Г., Кузьмин А.П., Куншина Г.Б., Локшин 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. P. 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. P. 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, P. 1197-1202
6. Патент РФ 2571478. Барышников В.Г., Ефименко Л.П., Афанасьев В.П. Состав композиции для получения сегнетоэлектрического материала титаната бария-стронция, где предложен состав для получения сегнетоэлектрического материала титаната бария-стронция.
7. Ким, Тхэк Вон Синтез золь-гель методом и свойства титаната бария-стронция-кальция для неохлаждаемых ИК-приемников: Автореф. дисс. кандидата технических наук : 05.27.06. Минск, 2010. - 15 с.
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. Диссертация на соискание степени кандидата химических наук, 2009 Санкт-Петербург 150с.
10. Иванов, К.В. Жидкофазный синтез ацетато-, оксалато- и гидроксотитанилов некоторых пS2 металлов, физико-химические характеристики их термических превращений и электрореологические свойства. Диссертация кандидата химических наук, 2011. Иваново, 150с
11. Payzullakhanov Mukhammad-Sultan Saidvalikhanovich, Xolmatov Abdurashid Abdurakhim ugli, Sobirov Muslim Muhsinjon ugli. Magnetic materials synthesized in the sun furnace // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2020. Vol. 7, Issue 4, pp.1499-13505.

12. Узбеков М.О., Тухтасинов А.Г. Измерения температуры нагрева абсорбера солнечного воздухонагревательного коллектора // *Universum: Технические науки : электрон. научн. журн.* 2020. № 6(75).
13. Узбеков М.О., Тухтасинов А.Г. Тепловая эффективность солнечного воздухонагревательного коллектора с металлическим стружечным абсорбером//*Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 2020 13(6): 712-720.
14. Holmatov A.A, Karimov J.X., Xayitov A.M. Effect of crystallizer catalyst on properties of glass-crystalline materials. // *EPRA International Journal of Research and Development (IJRD)*. 2021, pp.273-275.
15. Пайзуллаханов Мухаммаде-Султанхан Саидивалиханович, Холматов Абдурашид Абдурахим Угли, Собиров Муслимбек Мухсинжон Угли Титанаты бария и стронция, синтезированные на солнечной печи // *Universum: технические науки.* 2020. №6-1 (75).
16. Axmadaliyevich, Kuchkarov Akmaljon, and Egamberiyev Xomidjon Abdullayevich. "POSSIBILITIES OF GETTING ELECTRICITY WITH THE HELP OF A SMALL SOLAR FURNACE. //*EPRA International Journal of Research & Development* 6.6 (2021): 147-151.
17. Okhunov, D., Semenov, S., Gulyamov, S., Okhunova, D., & Okhunov, M. (2021). Tools to Support the Development and Promotion of Innovative Projects. In *SHS Web of Conferences* (Vol. 100). EDP Sciences.
18. Охунов, Д. М., & Охунов, М. Х. (2018). РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫБОРА АВТОМАТИЗИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТАМИ ПО СОЗДАНИЮ И РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ. In *САПР и моделирование в современной электронике* (pp. 147-150).
19. Okhunov, D., Okhunov, M., & Akbarova, M. (2019). Method of calculation of system reliability on the basis of construction of the logical function of the system. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 139, p. 01033). EDP Sciences.
20. A. M. Kasimaxunova, Maxsudjon Norbutaev, Madinaxon Baratova THERMOELECTRIC GENERATOR FOR RURAL CONDITIONS // *Scientific progress.* 2021. №6.
21. Зокиров Санжар Икромжон Угли, Норбутаев Маъсуджон Абдурасулович СОЛНЕЧНЫЙ ТРЕКЕР ДЛЯ ФОТОТЕРМОГЕНЕРАТОРА СЕЛЕКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ // *Universum: технические науки.* 2021. №4-5 (85).

22. Kasimakhunova A. M., Zokirov S. I., Norbutaev M. A. Development and Study of a New Model of Photothermogenerator of a Selective Radiation with a Removable Slit //Development. – 2019. – Т. 6. – №. 4.
23. Каримов Ж. Х., Фозилов И. Р. Управление многостадийными процессами путём оптимизации глобальных целей системы //Universum: технические науки. – 2020. – №. 3-1 (72). – С. 16-20.
24. Фозилов Х. Р., Фозилов И. Р. Экономический анализ и его роль в управлении предприятием //Вопросы управления и экономики: современное состояние актуальных проблем. – 2020. – С. 16-19.
25. Paizullakhanov MS, Kholmatov AA, Sobirov MM, Khamdamov B. Wear-Resistant Materials Synthesized in A Solar Furnace. // Journal of Material Sciences & Manufacturing Research. 2020.
26. Muhammad-Sultanhan, Paizullahanov, Sobirov Muslimjon Mukhsinjonugli, Xolmatov Abdurashid Abdurakhimugli. "Materials processing in the solar furnace." ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal. 10.10 (2020): 1233-1237.
27. Халилов, Ш. З., Умаров, Э. С., & Халилов, З. Ш. (2020). РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА. Журнал Технических исследований, 3(2).