

2. Синицын В.А. Прямой цифровой синтезатор сигналов: практическое пособие. / В.А.Синицын, А.Л.Беседа, М.В.Зубков. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2011. – 33с.
3. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis [Электронный ресурс] / Analog Devices Inc., 1999. – Режим доступа: http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf
4. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков / Ю.С.Магда. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208с.
5. CMOS 125MHz Complete DDS Synthesizer AD9850. Datasheet [Электронный ресурс] / Analog Devices Inc., 2004. — Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>

Надійшла до редколегії 21.12.2016.

УДК 539.216.2

ТАРАН В.Г., к.ф.-м., доцент
ТУРЧЕНКО Ю.О., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТИТАНАТА БАРИЯ ИЗ РАСПЛАВА С ИЗБЫТКОМ РУТИЛА

Введение. Для решения задач современной электроники, радиотехники, нелинейной оптики и управления лазерным излучением актуальной является проблема получения новых материалов с уникальными электрофизическими и оптическими свойствами, к которым относится стехиометрический титанат бария [1-3].

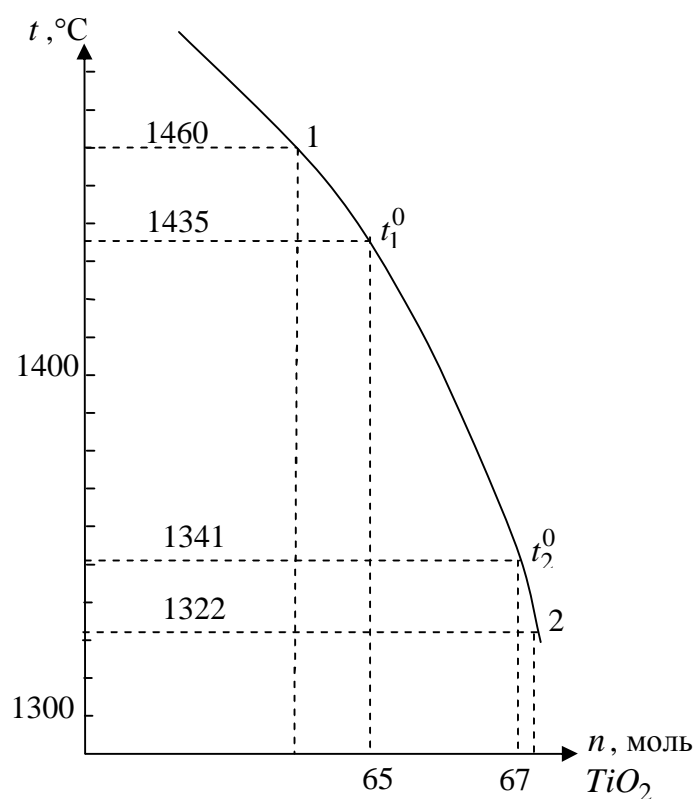
Постановка задачи. Стехиометрический титанат бария ($BaTiO_3$) обладает необходимыми для применения нелинейными свойствами в кубической и тетрагональной фазах, существующих при температурах ниже $1460^{\circ}C$. Однако температура плавления этого соединения, необходимая для кристаллизации, значительно выше ($1618^{\circ}C$). При ней существует необратимая гексагональная модификация, в которой эти свойства отсутствуют [4]. Для обхода этой модификации возможен метод выращивания $BaTiO_3$ из расплава нестехиометрического состава титаната бария с избытком рутила [5]. Он требует выполнения целого ряда условий температурного режима и следования диаграмме фазового равновесия компонентов среды образования кристаллов при механическом извлечении стехиометрического монокристалла. Исследование процесса выращивания объемных монокристаллов $BaTiO_3$ из расплава системы $BaTiO_3 - TiO_2$ является задачей настоящей работы.

Результаты работы. Основу ростового цикла для материала сложной системы составляет согласование динамики снижения температуры маточного расплава в соответствии с фазовой диаграммой компонентов загрузки $BaTiO_3 - TiO_2$ и скорости механического извлечения монокристалла стехиометрического титаната бария ($BaTiO_3$) необходимой кристаллической модификации. Это позволяет выбрать на затравку из фиксированного объема расплава максимальное количество требуемого материала. Так как температура гексагонального фазового перехода $1450^{\circ}C$, то кристаллизацию необходимо производить ниже этой границы.

Возможны два варианта подготовки шихты: 1) исходные порошки TiO_2 и BaO ; 2) порошки TiO_2 и $BaTiO_3$. На наш взгляд, более эффективным является второй вариант – смесь TiO_2 и $BaTiO_3$, в котором соотношение молярных компонент исходной

загрузки должны быть $35v_1 = 30v_2$ соответственно. Учитывая плотность порошков TiO_2 и $BaTiO_3$ $\rho_1 = 1,88 \cdot 10^3$ кг/м³ и $\rho_2 = 1,35 \cdot 10^3$ кг/м³ соответственно, а также их молярные массы $\mu_1 = 79,9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и $\mu_2 = 233,23 \cdot 10^{-3}$ кг/моль при объеме загрузки (объем платинового тигля) $V = 25$ см³, массы компонент исходной шихты составили $m_1 = \mu_1 v_1 = 8,18 \cdot 10^{-3}$ кг (TiO_2) и $m_2 = \mu_2 v_2 = 27,82 \cdot 10^{-3}$ кг ($BaTiO_3$), где v_1 и v_2 – количество исходных компонент в молях. На основании фазовой диаграммы [4] и учитывая методику [6], произведен расчет режима снижения температуры расплава в ростовом цикле. Температурный диапазон процесса выращивания должен быть между нижней границей гексагонализации 1460°C, точка 1 (рис.1) и эвтектической точкой 2 (1322°C). Для надежности результата реальный диапазон мы выбрали несколько уже: $t_1^0 = 1435^\circ\text{C}$, $t_2^0 = 1341^\circ\text{C}$.

Состав маточного расплава, в процессе роста кристалла удобно представить в виде:



t_1^0 – начальная температура расплава;
 t_2^0 – температура расплава в момент отрыва кристалла

Рисунок 1 – Рабочий участок фазовой диаграммы снижения температуры системы $BaTiO_3 - TiO_2$

$$(BaTiO_3)_{1-\frac{n}{100}} - (TiO_2)_{\frac{n}{100}}, \quad (1)$$

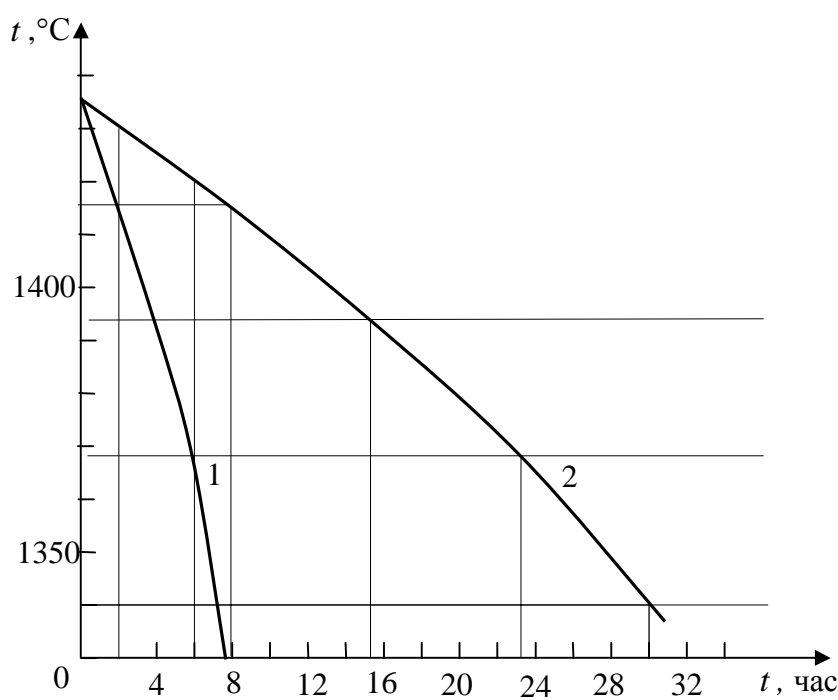
где n – количество молярных % TiO_2 , изменяющееся в ростовом цикле на участке температур от t_1^0 до t_2^0 . В процессе роста при снижении температуры и извлечении $BaTiO_3$ в виде монокристалла состав системы (1) изменяется, то есть увеличивается содержание компоненты TiO_2 . Чтобы процесс кристаллизации происходил оптимально (стехиометрически) в соответствии с фазовой диаграммой вдоль кривой 1-2 (рис.1), необходимо согласовать скорость снижения температуры dt^0/dt с заданной скоростью вытягивания кристалла dz/dt . Очевидно, что скорость увеличения массы образующегося кристалла $BaTiO_3$

$$\frac{dm}{dt} = S\rho \frac{dz}{dt}, \quad (2)$$

где dz – приращение длины кристалла за dt , S и ρ – площадь и плотность монокристаллической були. Тогда с учетом изменения усредненной молярной массы системы маточного расплава, согласно фазовой диаграммы, рассчитали dt^0/dt при фиксированных скоростях вытягивания $dz/dt = 1$ мм/час и 0,25 мм/час для сечения кристалла $S = 1$ см² (табл.1).

Таблица 1 – Параметры скорости охлаждения dt^0/dt маточного расплава системы $BaTiO_3-TiO_2$ и наращивания массы монокристалла m стехиометрического титаната бария от значения температуры t^0 в зоне кристаллизации

$t^0, ^\circ C$		1430	1420	1410	1400	1390	1380	1370	1360	1350	1340
$\frac{dt^0}{dt}$	$1 \frac{град}{час}$	8,5	9,5	10,6	11,8	12,9	14	15,1	16,1	17,2	18,2
	$0,25 \frac{град}{час}$	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7
$m \times 10^{-3}, кг$		0	0,3	0,7	1,0	1,6	2,1	2,6	3,5	4,2	4,5



1 – $dz/dt = 1 мм/час$; 2 – $dz/dt = 0,25 мм/час$

Рисунок 2 – Температурно-временная зависимость при скорости вытягивания dz/dt

Экспериментально установлено, что, выдерживая постоянным сечение кристалла, скорость снижения температуры нужно увеличивать при понижении температуры и при заданных скоростях вытягивания кристалла dz/dt следовать зависимостям (рис.2).

Выводы. Рассчитаны параметры ростового цикла титаната бария из расплава системы $BaTiO_3-TiO_2$ на ориентировочную затравку, используя которые удалось оптимизировать процесс выращивания оптически однородных монокристаллов титаната бария сечением до $1 см^2$ с минимальными механическими напряжениями и пригодных для использования в электрических и оптических элементах.

Установлен оптимальный температурный диапазон роста $1430-1340^\circ C$ и скорость вытягивания кристалла $\frac{dz}{dt} = 1 \div 0,25 \frac{мм}{час}$. Согласованы скорость снижения температуры расплава и фронтального роста кристалла $BaTiO_3$ в соответствии с фазовой диаграммой его стехиометрического состава.

Установлен оптимальный температурный диапазон роста $1430-1340^\circ C$ и скорость вытягивания кристалла $\frac{dz}{dt} = 1 \div 0,25 \frac{мм}{час}$. Согласованы скорость снижения температуры расплава и фронтального роста кристалла $BaTiO_3$ в соответствии с фазовой диаграммой его стехиометрического состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики-полупроводники / В.М.Фридкин. – М.: Наука, 1976. – 408с.
2. Барфут Дж. Полярные диэлектрики и их применение / Дж.Барфут, Дж.Тейлор. – М.: Мир, 1981. – 526с.

3. Кузьминов Ю.С. Сегнетоелектрические кристаллы для управления лазерным излучением / Ю.С.Кузьминов. – М.: Наука, 1982. – 400с.
4. Rase D.E. Phase Equilibria in the System $BaTiO_3-TiO_2$ / D.E.Rase, R.Roy // J.Amer.Cer.Soc. – 1955. – № 38. – P.102-113.
5. Петров А.А. Выращивание объемных монокристаллов титаната бария из раствора в расплаве методом Чохральского / А.А.Петров, Б.В.Афанасьев, Н.Ф.Карпенко // VI Всесоюзн. конф. по росту кристаллов, 16-17 ноября 1985 г.: сб. тезисов докл. – Ереван: Изд. АН АССР, 1985. – С.13.
6. Lompre P. Construction d'une machine de monocristaux application an titanate de baryum / P.Lompre. // J.Appl.Cryst. –1978. – V.11. – P.332-338.

Поступила в редколлегию 15.02.2016.

УДК537.311.6

БОЧКОВА Т.М.*, к.ф.-м.н., доцент
ПЛЯКА С.М.*, к.ф.-м.н., доцент
ТРУССЕВА Н.О., к.ф.-м.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

*Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПЕДАНСУ ОРТОГЕРМАНАТУ ВІСМУТУ МЕТОДОМ ЕКВІВАЛЕНТНИХ СХЕМ

Вступ. Кристалічний ортогерманат вісмуту ($Bi_4Ge_3O_{12}$, BGO), широко відомий сцинтилятор для детектування високоенергетичного випромінювання [1], в останні роки також застосовується як фоторефрактивний матеріал [2-3]. Для підвищення ефективності запису голографічних решіток необхідно знання механізмів переносу заряду в кристалах $Bi_4Ge_3O_{12}$. Це складна задача твердотільної електроніки, оскільки ортогерманат вісмуту – високоомний напівпровідник із шириною забороненої зони $\sim 4,5$ еВ. Шляхом комплексних досліджень в роботах [4-7] встановлено, що кристали ортогерманату вісмуту за своїми електричними властивостями (високий опір, стрибковий механізм електропровідності, степеневий характер зростання провідності у змінному полі, низька рухливість носіїв заряду та її активаційне зростання, низька концентрація рухливих носіїв заряду, значний час діелектричної релаксації) належать до релаксаційних напівпровідників. Наявність подвійної інжекції носіїв заряду з платинових електродів в кристал дозволяє спостерігати формування просторових зарядів різного типу: збіднених та збагачених основними носіями заряду. До температур ~ 425 К відбувається інжекція електронів і спостерігається явище струмів, що обмежуються просторовим зарядом, вище – спостерігається інжекція дірок і процеси рекомбінації, на які впливає наявність домішок. Дуже цікавим може бути зіставлення запропонованої моделі та експериментальних даних частотних вимірювань повного комплексного опору $Z^*(\omega)$ кристала. Як відомо, графічна залежність $Z^*(\omega)$ у координатах Z', Z'' (координати Найквіста) називається годографом імпедансу або його спектром. Побудова годографів імпедансу корисна для інтерпретації його частотних залежностей. У цьому випадку аналізується відповідність виду годографа досліджуваного зразка годографу еквівалентної електричної схеми, кожен елемент якої характеризує фізичний або електрохімічний процес, що протікає в реальному досліджуваному зразку. Раніше імпеданс кристалів $Bi_4Ge_3O_{12}$ вивчався тільки для температур вище 775 К [8].

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз процесів переносу заряду в