

Физика и материаловедение

УДК 537.311.32

Н.С. Костюков, С.М. Соколова

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОМ И КОСМИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ МАГНЕЗИАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

В статье сделана попытка теоретического анализа свойств магнезиальной керамики для атомного и космического материаловедения с использованием теории вынужденных колебаний.

Ключевые слова: релаксация, поляризация, диэлектрическая проницаемость, электропроводность, магнезиальная керамика.

POSSIBLE APPLICATIONS OF MAGNESIA CERAMICS IN ATOMIC AND SPACE MATERIALS SCIENCE

The paper attempts to theoretically analyze the magnesia ceramics properties used for the nuclear and space materials with the application of the forced oscillations theory.

Key words: relaxation, polarization, dielectric permittivity, conductivity, magnesia ceramics.

Оксид магния (жженная магнезия, периклаз) – химическое соединение с формулой MgO , белые кристаллы, не растворимые в воде, пожаро- и взрывобезопасный.

Оксид магния – один из распространенных огнеупорных окислов [1]. Является абсолютным отражателем – веществом с коэффициентом отражения, равным единице в широкой спектральной полосе. Может применяться как доступный эталон белого цвета.

Проводимость MgO кислородная. Число переноса $K_O = 1$.

Область релаксации в керамике $R = 10^{-10} \div 10^{-6}$ м зависит от технологии изготовления, плотность $\rho = 3580$ кг/м³ [1]. При длине волны $\lambda = 0,254 \cdot 10^{-6}$ м коэффициент преломления $n = 1,845$. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_\infty = n^2 = (1,845)^2 = 3,4$.

Резонансная частота колебаний иона кислорода в керамических структурах MgO определяется по формуле [2]:

$$\omega^2 = \frac{q^2}{\pi \epsilon_0 \epsilon_\infty R^3 m}, \quad (1)$$

где q – заряд; $\pi = 3,14$; ϵ_0 – электрическая постоянная; m – масса.

Рассчитанные значения резонансной частоты иона кислорода в зависимости от возможной величины зоны релаксации R приведены в табл. 1.

Различия в величине области релаксации могут определяться технологическими параметрами производства керамики – дисперсностью помола, температурой обжига и проч.

Удельная объемная электропроводность $\gamma_2 = 10^{-11}$ Ом⁻¹·м⁻¹ при температуре 300 К.

Следовательно, коэффициент затухания

$$2b = \frac{n_0 \cdot q^2}{\gamma \cdot m_0}, \quad (2)$$

где n_0 – число ионов кислорода, участвующих в проводимости.

$$2b = \frac{2,52 \cdot 10^4 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38}}{10^{-11} \cdot 2,68 \cdot 10^{-28}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}, \text{ т.е. } b = 1,2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

Таблица 1

Значения резонансной частоты иона кислорода в оксиде магния при различной величине области релаксации [2]

R, м	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
$\omega_0, \text{ с}^{-1}$	$2,336 \cdot 10^{13}$	$6,325 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$	$6,325 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{10}$	$6,325 \cdot 10^8$
$\omega_0^2, \text{ с}^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{26}$	$4 \cdot 10^{29}$	$4 \cdot 10^{26}$	$4 \cdot 10^{23}$	$4 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{17}$

Учитывая, что резонансная частота кислорода при изменении величины области релаксации R от $4,2 \cdot 10^{-10}$ м до $1 \cdot 10^{-6}$ м находится в области $\omega_0 = 10^{13} \div 10^8 \text{ с}^{-1} \gg b = 2,39 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, можно заключить: колебания иона кислорода в керамике MgO имеют упругий резонансный характер и диэлектрические характеристики описываются формулами для этой области [3].

В области дисперсионных частот ($\omega \sim \omega_0$) теоретически возможные значения диэлектрической проницаемости в зависимости от величины возможной зоны релаксации:

$$\xi = 3,4 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 2,7 \cdot 10^{28} \cdot 3,14 \cdot 10^{-18} \right) = 3,4 \left(1 + 5,652 \cdot 10^{10} \right) = 19,22 \cdot 10^{10} \text{ при } R = 10^{-6} \text{ м;}$$

$$\xi = 3,4 \left(1 + 5,652 \cdot 10^7 \right) = 19,22 \cdot 10^7 \text{ при } R = 10^{-7} \text{ м;}$$

$$\xi = 3,4 \left(1 + 5,652 \cdot 10^4 \right) = 19,22 \cdot 10^4 \text{ при } R = 10^{-8} \text{ м;}$$

$$\xi = 3,4 \left(1 + 5,652 \cdot 10^1 \right) = 3,4 + 19,22 \cdot 10 = 195,6 \text{ при } R = 10^{-9} \text{ м;}$$

$$\xi = 3,4 \left(1 + 5,652 \cdot 10^{-2} \right) = 3,4 + 0,19 = 3,59 \text{ при } R = 10^{-10} \text{ м.}$$

По экспериментальным данным в этой области частот $\epsilon' \sim 8 \div 12$.

Для уточнения области релаксации берем результаты расчетов [2]. Для кубической решетки с ребром $4,20 \text{ \AA}$ – $R = 4,2 \cdot 10^{-10}$ м.

$$\xi = 3,4 \left(1 + 418,75 \cdot 10^{-2} \right) = 3,4 + 14,2 = 17,6.$$

Таким образом, если область релаксации находится в диапазоне от 10^{-10} до $4,2 \cdot 10^{-10}$ м, то $\epsilon' \sim 4 \div 18$, т.е. соответствует экспериментальным значениям.

Для коэффициента диэлектрических потерь [4]:

$$\epsilon'' = \frac{2}{3} \frac{n \alpha''}{\epsilon} = \frac{2}{3} n \pi R^3 \epsilon_0 \frac{\omega}{Q}, \quad (3)$$

где α'' – мнимая часть поляризуемости; ω – частота.

При концентрации O^2 $n = 2,7 \cdot 10^{28}$ ядер/м³ получим значения коэффициента диэлектрических потерь в зависимости от величины зоны релаксации:

$$\epsilon'' = \frac{2}{3} \cdot 2,7 \cdot 10^{28} \cdot 3,14 \cdot 10^{-18} \cdot 3,4 \frac{\omega}{6,325 \cdot 10^8} = 3,038 \cdot 10^2 \cdot \omega, \text{ при } R = 10^{-6} \text{ м;}$$

$$\epsilon'' = 9,608 \cdot 10^{-3} \omega, \text{ при } R = 10^{-7} \text{ м;}$$

$$\epsilon'' = 3,038 \cdot 10^{-7} \omega, \text{ при } R = 10^{-8} \text{ м;}$$

$$\epsilon'' = 9,608 \cdot 10^{-12} \omega, \text{ при } R = 10^{-9} \text{ м;}$$

$\xi'' = 3,038 \cdot 10^{-16} \omega$, при $R=10^{-10}$ м;

$\xi'' = 2,25 \cdot 10^{-14} \omega$, при $R=4,2 \cdot 10^{-10}$ м.

То есть в общем виде для любой частоты ω $\xi'' = 2,25 \cdot 10^{-14} \cdot \omega$.

При частоте $\omega = \omega_0$, $\xi'' = 2,25 \cdot 10^{-14} \cdot 2,336 \cdot 10^{13} = 2,25 \cdot 2,336 \cdot 10^{-1} = 0,53$.

Данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

Возможные значения диэлектрических характеристик магниальной керамики в зависимости от величины зоны релаксации R

При R (м)	ϵ'	ϵ''	Уточнение значений R по результатам работы [2] $= 1,2 \cdot 10^{10}$ м
10^{-6}	$19 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^2 \cdot \omega$	Значения для этой величины $R \sim \epsilon' = 17,6$
10^{-7}	$19 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^3 \cdot \omega$	Для $\epsilon'' = 2,25 \cdot 10^{-14} \omega$. Так как в области дисперсии $\omega = \omega_0 = 2,336 \cdot 10^{13}$, то $\epsilon'' = 2,25 \cdot 2,336 \cdot 10^{-1} = 0,53$
10^{-8}	$19 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-7} \cdot \omega$	
10^{-9}	195	$9,6 \cdot 10^{-12} \cdot \omega$	
10^{-10}	3,59	$3 \cdot 10^{-16} \cdot \omega$	
$4,2 \cdot 10^{-10}$	17,6	$2,25 \cdot 10^{-14} \cdot \omega$	

Полученные зависимости для диэлектрических характеристик в зоне релаксации R позволяют через их связь с оптическими характеристиками найти соответствующие закономерности, важные для космического материаловедения.

Выражение для коэффициента r при однократном отражении имеет вид:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \sqrt{2(\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}) + 1}}{\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + \sqrt{2(\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}) + 1}}. \quad (4)$$

При $\epsilon' = 17,6$; $\epsilon'' = 0,53$; $\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} = \sqrt{17,6^2 + 0,53^2} = 17,61$;

$$\sqrt{2(\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2})} = \sqrt{2(17,6 + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2})} = \sqrt{2(17,6 + 17,61)} = \sqrt{70,42} = 8,39;$$

$$r = \frac{10,22}{27} = 0,378.$$

Постоянная поглощения через диэлектрические параметры имеет вид:

$$\chi = \sqrt{\frac{-\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}}{2}} = \sqrt{\frac{-17,6 + 17,61}{2}} = \sqrt{\frac{0,01}{2}} = 0,071.$$

Показатель поглощения через диэлектрические параметры имеет вид:

$$\mu = \frac{2\pi\sqrt{2(-\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2})}}{\lambda} = \frac{2\pi\sqrt{2(-17,6 + 17,61)}}{\lambda} = \frac{2\pi\sqrt{0,02}}{\lambda} = \frac{0,04\pi}{\lambda},$$

где λ – длина волны падающего света.

Экспериментальные значения для ряда керамических материалов при однократном отражении для неглазурованного фарфора – 0,43, для глазурованного – 0,55 при $\lambda = 0,5$ мкм [5].

Таким образом, теоретические расчеты по теории вынужденных колебаний для керамики MgO, обладающей кислородной проводимостью, показывают, что все электротехнические параметры (γ , ϵ' , ϵ'' , $\text{tg}\delta$) в области поляризации при частотах до 10^{14} с⁻¹ не противоречат экспериментальным результатам при величине зоны релаксации $R \sim 10^{-10} \div 4,2 \cdot 10^{-10}$ м. Такая величина области, как показано [2], является реальной для кристаллических структур MgO. Вынужденные колебания при этом носят упругий резонансный характер и переходят в релаксационный режим колебаний при $R > 10^{-6}$ м.

Из полученных диэлектрических закономерностей определяются оптические характеристики, важные для космического материаловедения.

1. Будников, П.П., Булавин, И.А., Выдрик, Г.А., Костюков, Н.С. и др. Новая керамика. – М.: Стройиздат, 1969. – 311 с.
2. Еремин, И.Е., Еремина, В.В., Костюков, Н.С. Моделирование электронно-атомной структуры конденсированных диэлектриков. Научно-практическое издание. – Благовещенск: АмГУ, 2006. – 100 с.
3. Костюков, Н.С., Щербакова, Е.В., Соколова, С.М. Анализ частотных характеристик неорганических диэлектриков с одним типом релаксаторов // Электричество. – 2015. – № 7. – С. 62-66.
4. Костюков, Н.С., Соколова С.М. Диэлектрические потери в микролите при наличии нескольких релаксаторов // Электричество. – 2014. – № 3. – С. 62-66.
5. Физические величины. Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Зейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.

УДК 538.975

В.Л. Дубов, Д.В. Фомин

**ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИСИЛИЦИДА БАРИЯ НА SI (111)
МЕТОДАМИ РЕАКТИВНОЙ И ТВЕРДОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ
И ИССЛЕДОВАНИЕ IN-SITU ИХ СВОЙСТВ***

В работе выполнено формирование тонких пленок дисилицида бария методами реактивной и твердофазной эпитаксии. Полученные пленки исследованы in-situ методами электронной оже-спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии электронами.

Ключевые слова: тонкие пленки, реактивная эпитаксия, твердофазная эпитаксия, кремний, барий.

**FORMATION OF THIN FILMS DISILICIDE BARIUM IN SI (111) BY REACTIVE
AND A SOLID EPITAXY AND IN-SITU STUDY OF THEIR PROPERTIES**

This paper presents the results of barium silicide thin films formation gained with reactive methods and solid phase epitaxy. The resulting films were studied in-situ with the methods of Auger electron spectroscopy and electron energy loss.

Key words: thin film, reactive deposition epitaxy, solid phase epitaxy, silicon, barium.

Введение

На данном временном этапе научным сообществом ведется активный поиск материалов для создания фотоэлектрических преобразователей с лучшими свойствами и меньшей стоимостью, чем существующие. Основой для таких материалов могут служить тонкие пленки щелочноземельных си-

* Работа выполнена при поддержке некоммерческого благотворительного фонда Прохорова в рамках конкурса «Академическая мобильность» по договору №АМ-153/15.