УДК 519.713

© 2020 г. **В.В. Еремина**¹, канд. физ.-мат. наук,

О.В. Жилиндина¹, канд. техн. наук,

Е.А. Подолько², канд. физ.-мат. наук

(¹Амурский государственный университет, Благовещенск,

²Дальневосточный государственный аграрный университет, Благовещенск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КЕРАМИК. I

Рассматривается эффективность математического моделирования эксплуатационных частотных спектров композиционных материалов, обусловленных процессами упругой электронной поляризации. В первой части работы представлены обзор промышленных образцов и базовая математическая модель.

Ключевые слова: компонентный состав, диэлектрическая проницаемость, кибернетическая модель, электронная поляризуемость, экранирующий вклад.

DOI: 10.22250/isu.2020.65.62-73

Введение

На текущий момент все больше внимания уделяется созданию электронных устройств, принцип действия которых основан на непосредственном использовании диэлектрических параметров кристаллов, обусловленных их поляризационными свойствами в слабых электромагнитных полях. При этом область технического применения диэлектриков рассматриваемого класса уже не ограничивается функцией только пассивных элементов электротехнических схем. Кроме того, расширяющееся внедрение наукоемких технологий естественным образом повышает и общий уровень технических требований, предъявляемых к материалам.

С одной стороны, считается, что наиболее адекватной трактовкой микропроцессов, индуцированных воздействием на вещество внешнего электри-

ческого поля, является их описание с помощью квантовой теории. Однако ее методология подразумевает использование набора гамильтонианов, что приводит к громоздкости исходных математических моделей и весьма затрудняет возможность генерации приемлемого конечного результата [1 – 12].

С другой стороны, потенциальная результативность математического моделирования диэлектрических спектров конденсированных материалов обеспечивается простотой математических моделей рассматриваемых процессов, общепринятых в рамках классической теории поляризации диэлектриков [13 – 27].

Электрические свойства керамических материалов

Детали и сборочные единицы, изготовленные из технической электрокерамики, широко применяются в современной электронике, автоматике, тепломеханике и вычислительной технике благодаря их желаемым эксплуатационным свойствам. При этом можно отметить высокую механическую прочность, малые диэлектрические потери, инертность к воздействию агрессивных сред, значительную радиационную стойкость, стабильность продолжительной работы при резком повышении температуры, а также при изменении влажности или давления.

Общепринятая физическая классификация керамических диэлектриков подразделяет их на четыре основные группы [28 – 31]: образцы с относительной диэлектрической проницаемостью ниже двенадцати единиц; образцы с высокой диэлектрической проницаемостью; образцы с явными пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами; образцы с ферромагнитными свойствами.

Керамические изделия первой группы пользуются наибольшим спросом в промышленности. В первую очередь к ним относятся различные виды фарфора. При этом почти половина всего выпускаемого в мире фарфора приходится на долю низковольтных и высоковольтных изоляторов, а другая половина охватывает столовую посуду, художественные изделия и химический фарфор.

При выборе конструкционного материала для каркасов нагревательных элементов электротехнических устройств чаще всего обращают внимание на отсутствие деформации при значительной механической нагрузке, высокое электрическое сопротивление и теплостойкость, что свойственно стеатитовой керамике. В свою очередь, если в конструкторском решении требуются более низкие диэлектрические потери, то применяют форстеритовую керамику.

В свою очередь уникальные свойства высокоглиноземистой керамики позволяют использовать данный материал для высокочастотной изоляции. Типичные примеры ее применения – это герметические вводы для трансформаторов, корпуса конденсаторов, высоковольтные переключатели, элементы двигателей.

Вторая группа материалов базируется на физических свойствах химической композиции двуокиси титана с другими окислами. Путем изменения компонентного состава образцов можно получать разнообразные керамические материалы с характеристиками, отвечающими специальным требованиям. Подобные диэлектрики полностью пригодны для изготовления резонансных контуров или других электроцепей, при функционировании которых необходимы добротность и стабильность диэлектрической проницаемости. При этом температурный коэффициент диэлектрической проницаемости может быть заранее определен для нескольких составов, регулировка которых обеспечивает возможность решения задачи температурной компенсации в электронных схемах.

С другой стороны, сегнетоэлектрические свойства, нежелательные для конденсаторов, оказываются полезными в нелинейных электрических цепях, эффективность работы которых обеспечивается материалами третьей группы. При этом зависимость диэлектрической проницаемости от частоты внешнего поля благоприятствует применению соответствующих образцов в его усилителях.

Как известно, любые диэлектрики в той или иной мере обладают электрострикционными свойствами, т.е. в них имеет место механическая деформация, пропорциональная величине приложенного электрического поля. Данная физическая особенность слабо проявляется у обычных диэлектриков и не является обратимой, так как механическая деформация не вызывает их поляризации. Однако титановая керамика обладает наличием как прямого, так и обратного пьезоэлектрического эффекта, что обусловлено ее кристаллической структурой.

И, наконец, мягкие ферромагнитные материалы, образующие четвертую классификационную группу, представляют собой различные окислы металлов, спекаемые в твердые плотные образцы. В промышленности ферриты начали использоваться более полувека назад; они были разработаны как альтернатива металлическим магнитам, для снижения потерь энергии на перемагничивание. Такая замена стала возможной благодаря высокому электрическому сопротивлению керамики и, следовательно, значительному снижению вихревых токов, а также связанных с ними электромагнитных потерь.

Наиболее перспективной разновидностью изоляционной керамики являются керамические электролиты, т.е. материалы с высокой ионной подвижностью и соответственно ионной проводимостью. В отличие от классических жидких электролитов проводимость многих керамических электролитов униполярна и обусловлена чаще всего разупорядочением одной из подрешеток кристаллов.

Керамика широко используется и в качестве полупроводникового материала специального назначения. Например, на ее основе производятся терморезисторы и варисторы, изменяющие электрическое сопротивление под действием температуры и напряжения приложенного поля. Терморезисторы имеют широкое применение в электронных приборах, системах противопожарного оповещения, дистанционного измерения и регулирования температуры. Варисторы используют как элементы устройств, предназначенных для защиты систем переменного тока от импульсных перенапряжений, они незаменимы в стабилизаторах напряжений и регуляторах токов низкой частоты.

Важнейшим для электронной техники является оксид алюминия (корунд), доминирующий на мировом рынке. Основная область применения корундовой керамики – подложки интегральных схем. В отличие от пластмасс и фарфора, используемых для тех же целей, эта керамика обладает уникальным сочетанием высокого электрического сопротивления и теплопроводности.

Весьма перспективной является керамика, спекаемая на основе оксида иттрия, так как она практически прозрачна в видимой и инфракрасной областях спектра. Поскольку материалы на основе прозрачного оксида иттрия, легированного ионами редкоземельных элементов, по интенсивности поглощения приближаются к соответствующим монокристаллам, то появилась возможность использовать иттриевую керамику для создания оптического квантового генератора.

В ядерных энергетических установках специальная электротехническая керамика широко применяется в качестве теплоизоляции (Al_2O_3 , SiO_2), замедляющих и отражающих материалов (BeO , ZrO_2), материалов нейтронной защиты (HfO_3 , Sm_2O_3) и даже ядерного топлива (UO_2 , PuO_2).

Компонентный состав промышленных образцов

Керамические диэлектрики представляют собой неорганическую многокомпонентную систему, состоящую из стекловидной, кристаллической и газовой фаз, представленных в тех или иных пропорциях. Поскольку разно-

образии физических свойств электрокерамических материалов не позволяет выделить минимальное количество общих признаков, то компактно классифицировать электрокерамические материалы по явно выделенному признаку типа «физическое свойство» очень сложно. Именно потому в основу классификации промышленных образцов положен химический анализ их компонентного состава [32 – 39].

В связи с ростом требований к электротехнической керамике широкое применение имеют ее высокоглиноземистые образцы, содержащие более 45% кристалла оксида алюминия Al_2O_3 . В зависимости от химического состава названные материалы делятся на муллитокремнеземистые (45-70% Al_2O_3), муллитокорундовые (70-90% Al_2O_3) и корундовые (90-100% Al_2O_3). Химический состав наиболее востребованных промышленных образцов высокоглиноземистых керамик представлен в табл. 1.

Таблица 1

Образцы	Содержание оксидов, % масс.											
	Al_2O_3	SiO_2	MgO	B_2O_3	Na_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	MnO	Fe_2O_3	K_2O	BaO
Поликор	99,70	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Микролит	99,34	0,05	0,48	-	0,10	0,03	-	-	-	-	-	-
ГБ-7	97,09	0,92	-	0,92	0,09	0,90	0,15	-	-	0,03	-	-
22Х	94,87	2,39	-	-	0,05	-	-	0,47	2,14	0,08	-	-
ВК94-1	94,87	2,50	-	-	0,20	-	-	0,46	1,94	0,03	-	-
Уралит	79,94	13,95	1,42	0,64	0,65	2,71	-	-	-	0,35	0,34	-
УФ-46	76,32	16,23	1,88	-	0,58	1,80	-	-	-	0,03	0,70	3,16
102	72,50	16,50	2,00	-	-	2,50	-	-	-	-	-	6,50
МГ-2	60,14	22,32	2,54	1,87	0,29	2,34	-	-	-	0,40	0,38	10,10

Клиноэнстатитовая (стеатитовая) керамика получила название благодаря своей базовой составляющей – метасиликату магния $MgO \cdot SiO_2$ (клиноэнстатит). Кроме того, в системе $MgO-SiO_2$ имеет место еще один минерал – это метасиликат ортосиликат магния $2MgO \cdot SiO_2$ (форстерит). Основной кристаллической фазой всех стеатитовых материалов является клиноэнстатит, составляющий 60-70% от общей массы промышленных образцов. Химический состав некоторых стеатитовых керамик приведен в табл. 2.

Таблица 2

Образцы	Содержание оксидов, % масс.								
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	BaO	ZnO
СПК-2	6,90	63,3	0,92	1,65	26,60	0,16	0,47	-	-
СК-1	1,07	53,65	0,91	0,01	29,01	0,01	0,04	15,30	-
СНЦ	1,37	53,00	0,90	0,16	27,70	0,04	0,08	11,40	5,35
СНБ	2,14	48,50	3,54	0,67	31,55	-	-	13,23	-

В свою очередь, в системе $Al_2O_3-SiO_2-MgO$ имеется тройственное соединение $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ – кордиерит, кристаллизующийся по типу

муллита. Как и все другие керамические материалы, кордиеритовая керамика обладает различным химическим составом (табл. 3).

Таблица 3

Образцы	Содержание оксидов, % масс.						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Л-24	49,51	41,67	7,20	1,00	0,50	0,61	2,01
К-2	50,81	39,60	6,86	0,15	0,46	0,47	1,62
К-4	51,90	38,05	7,37	0,16	0,50	0,45	1,57
КД-2	33,60	59,60	13,33	0,14	0,84	0,36	2,13

В форстеритовой керамике основной кристаллической фазой является ортосиликат магния 2MgO·SiO₂ (форстерит). Промышленный синтез форстерита, а также производство из него одноименной керамики, как правило, основан на использовании природного сырья (табл. 4).

Таблица 4

Образцы	Содержание оксидов, % масс.						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
КВФ-4	4,3	41,6	46,4	-	-	-	0,16

Кварцевая керамика – это название изделий, полученных методами керамической технологии из кремнезема в некоторых его модификациях. Она представляет собой уникальный материал, основу которого составляет не кристаллическая, а стекловидная фаза (табл. 5).

Таблица 5

Образцы	Содержание оксидов, % масс.						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
М-23	17,18	77,56	0,37	1,93	2,5	0,23	0,16

Фактические значения диэлектрической проницаемости (ϵ и ϵ_{∞}) рассматриваемых керамик представлены в табл. 6.

Таблица 6

Классификационные группы и подгруппы		Образцы	ϵ	ϵ_{∞}
Высокоглиноземистая керамика	Корундовая	Микролит	9,9	3,100
	Муллитокремнеземистая	МГ-2	7,7	3,045
	Муллитокорундовая	Уралит	8,0	2,863
Стеатитовая керамика	Клиноэнстатитовая	СК-1	6,0	2,650
	Форстеритовая	СНБ	7,5	2,573
Кордиеритовая керамика		Л-24	5,0	2,571
Кварцевая керамика		М-23	6,5	2,335

Объективный анализ систематизированных данных показывает, что компонентный состав исследуемых оксидных керамик существенно влияет на их результирующие поляризационные свойства, которые и определяют поведенческую страту изучаемых частотных диэлектрических спектров.

Кибернетическая модель электронной поляризации

Хорошо известно, что упругая электронная поляризация является аддитивным свойством любого вещества, не зависящим от его структуры или агрегатного состояния, так как определяется вынужденными колебаниями электронных оболочек отдельно взятых частиц, образующих конкретное химическое соединение. Следовательно, в рамках практического расчета частотных диэлектрических характеристик композиционного образца можно уверенно использовать совокупность классических математических моделей электрической деформации общей совокупности электронных оболочек ионов, входящих в его состав [13 – 27].

Таким образом, исходная теоретическая модель, непосредственно трансформированная для корректного описания реального керамического материала, может быть представлена в достаточно универсальной форме [39 – 47]:

$$\frac{d^2\mu_{f,k}(t)}{dt^2} + 2\beta_{f,k} \frac{d\mu_{f,k}(t)}{dt} + \omega_{0f,k}^2 \mu_{f,k}(t) = \frac{2e^2}{m_e} E(t),$$
$$f = \overline{1, F}, k = \overline{1, K_f}; \quad (1)$$

$$E(t) = E_0(t) - \frac{2}{3\varepsilon_0} \sum_{i=1}^F C_i \left(\sum_{j=1}^{K_i} \mu_{i,j}(t) N_{i,j} \right),$$

здесь F – общее число разновидностей композитов, составляющих исследуемый керамический образец; C_i – их процентное содержание в материале; K_f – количество элементарных поляризационных процессов, происходящих в каждом из композитов и определяемых его собственной электронной конфигурацией.

Во второй типовой форме записи исходная система дифференциальных уравнений принимает более удобный алгебраический вид:

$$s^2\mu_{f,k}(s) + 2\beta_{f,k}s\mu_{f,k}(s) + \omega_{0f,k}^2 \mu_{f,k}(s) = \frac{2e^2}{m_e} E(s);$$
$$E(s) = E_0(s) - \frac{2}{3\varepsilon_0} \sum_{i=1}^F C_i \left(\sum_{j=1}^{K_i} \mu_{i,j}(s) N_{i,j} \right). \quad (2)$$

На основании выражения (2) может быть сформирована структурная схема общей совокупности процессов электронной поляризации образца (рис. 1).

В свою очередь, из названной системы уравнений и эквивалентной ей структурной схемы вытекает вещественная частотная характеристика $\varepsilon'(\omega)$ комплексной диэлектрической проницаемости материала:

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \frac{2}{3\varepsilon_0} \sum_{i=1}^F \left(C_i \sum_{j=1}^{K_i} \alpha'_{i,j}(\omega) N_{i,j} \right);$$

$$\alpha'_{f,k}(\omega) = 2e^2 / m_e \frac{\omega_{0f,k}^2 - \omega^2}{(\omega_{0f,k}^2 - \omega^2)^2 + 4\beta_{f,k}^2 \omega^2}.$$
(3)

Рис. 1. Схема электронной поляризации типичной оксидной керамики.

Мнимая частотная характеристика $\varepsilon''(\omega)$ комплексной диэлектрической проницаемости рассматриваемых материалов описывается с помощью выражений:

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{2}{3\varepsilon_0} \sum_{i=1}^F \left(C_i \sum_{j=1}^{K_i} \alpha''_{i,j}(\omega) N_{i,j} \right),$$

$$\alpha''_{f,k}(\omega) = \frac{2e^2}{m_e} \frac{2\beta_{f,k} \omega_{0f,k}}{(\omega_{0f,k}^2 - \omega^2)^2 + 4\beta_{f,k}^2 \omega^2}.$$
(4)

Следует отметить, что, учитывая традиционную структуру выражения $\varepsilon'(\omega)$, представленную уравнениями (3), для повышения быстродействия расчетов, выполняемых на ЭВМ, можно использовать предварительно подготовленные частотные спектры вещественной части диэлектрической восприимчивости $\chi'(\omega)$:

$$\chi'_f(\omega) = \varepsilon'_f(\omega) - 1 = \frac{2}{3\varepsilon_0} \sum_{j=1}^{K_f} \alpha'_j(\omega) N_j. \quad (5)$$

При этом результирующий спектр $\varepsilon'(\omega)$ может быть сформирован на базе заранее подготовленных массивов $\chi'(\omega)$ путем их сложения по формуле:

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \sum_{i=1}^F C_i \chi'_i(\omega). \quad (6)$$

Кроме того, предлагаемый подход позволяет существенно снизить порядок конечных передаточных функций, выражающих суммарный вклад всех электронных пар, имеющихся в конкретном керамическом образце, что также способствует увеличению скорости проводимых вычислений.

Заключение

Достаточно очевидно, что любой реальный физический процесс всегда обладает той или иной степенью нелинейности. Однако математические модели вынужденной электрической деформации микрочастиц кристаллического вещества, рассматриваемые в рамках исследуемой проблемы, могут быть достаточно достоверно представлены уравнениями линейных гармонических колебаний.

Названное обстоятельство, с одной стороны, обеспечивает возможность интеграции фундаментальных положений классической физики диэлектриков с математическими методами классической теории управления. С другой стороны, оно существенно приближает общую перспективу достижения конечной цели – моделирования диэлектрических спектров композиционных материалов, наиболее адекватных их наблюдаемым физическим свойствам.

Иными словами, задачи изучения поляризационных явлений, происходящих в реальных кристаллических средах под действием электромагнитного поля с малой амплитудой, могут быть успешно решены на базе разработки новых математических моделей характеристик соответствующих сложных систем.

При этом на первоначальном этапе построения концептуальной модели взаимодействия конкретной системы с приложенным к ней слабым электромагнитным полем целесообразно использовать трактовки классической теории поляризации, так как они обладают наибольшей степенью наглядности.

В свою очередь, практическое построение исходных теоретических описаний общей совокупности поляризационных процессов, а также их по-

следующие математические преобразования, направленные на формирование конечных утилитарных выражений, могут быть выполнены с помощью математического аппарата классической теории управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Roldan-Charria J.* Indivisibility, Complementarity and Ontology: A Bohrian Interpretation of Quantum Mechanics // *Foundations of Physics*. – 2014. – V. 44, № 12. – P. 1336-1356.
2. *Chun Miao, Shu-Dong Fang, Ping Dong, Zhuo-Liang Cao.* Remote Preparation of Quantum Entangled State in a Non-Markovian Environment // *International Journal of Theoretical Physics*. – 2014. – V. 53, № 12. – P. 4098-4106.
3. *Cenatiempo S., Giuliani A.* Renormalization Theory of a Two Dimensional Bose Gas: Quantum Critical Point and Quasi-Condensed State // *Journal of Statistical Physics*. – 2014. – V. 157, № 4-5. – P. 755-829.
4. *Sych D., Leuchs G.* Quantum Uniqueness // *Foundations of Physics*. – 2015. – V. 45, № 12. – P. 1613-1619.
5. *Robinson T.R., Haven E.* Quantization and Quantum-Like Phenomena: A Number Amplitude Approach Environment // *International Journal of Theoretical Physics*. – 2015. – V. 54, № 12. – P. 4576-4590.
6. *Hamid Reza Naeij, Afshin Shafiee.* Double-Slit Interference Pattern for a Macroscopic Quantum System // *Foundations of Physics*. – 2016. – V. 46, № 12. – P. 1634-1648.
7. *Qing-bin Luo, Guo-wu Yang, Kun She, Xiaoyu Li.* Quantum Private Comparison Protocol with Linear Optics // *International Journal of Theoretical Physics*. – 2016. – V. 55, № 12. – P. 5336-5343.
8. *Hansen F.* Quantum Entropy Derived from First Principles // *Journal of Statistical Physics*. – 2016. – V. 165, № 5. – P. 799-808.
9. *Yoshiko Ogata.* A Class of Asymmetric Gapped Hamiltonians on Quantum Spin Chains and its Characterization. I // *Communications in Mathematical Physics*. – 2016. – V. 348, № 3. – P. 847-895.
10. *Moreira C., Wichert A.* Are Quantum Models for Order Effects Quantum // *International Journal of Theoretical Physics*. – 2017. – V. 56, № 12. – P. 4029-4046.
11. *Satoshi Nakajima, Yasuhiro Tokura.* Excess Entropy Production in Quantum System: Quantum Master Equation Approach // *Journal of Statistical Physics*. – 2017. – V. 169, № 5. – P. 902-928.
12. *Berry D.W., Childs A.M., Ostrander A., Guoming Wang.* Quantum Algorithm for Linear Differential Equations with Exponentially Improved Dependence on Precision // *Communications in Mathematical Physics*. – 2017. – V. 356, № 3. – P. 1057-1081.
13. *Мотт Н.Ф., Герни Р.В.* Электронные процессы в ионных кристаллах. – М.: ИИЛ, 1950.
14. *Хинпель А.Р.* Диэлектрики и их применение. – М.; Л.: ГЭИ, 1959.
15. *Хинпель А.Р.* Диэлектрики и волны. – М.: ИИЛ, 1960.
16. *Браун В.* Диэлектрики. – М.: ИИЛ, 1960.
17. *Фрелих Г.* Теория диэлектриков. – М.: ИИЛ, 1960.
18. *Деккер А.* Физика электротехнических материалов. – М.; Л.: ГЭИ, 1962.
19. *Богородицкий Н.П. и др.* Теория диэлектриков. – М.; Л.: Энергия, 1965.

20. Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков. – М.: Наука, 1968.
21. Губкин А.Н. Физика диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1971.
22. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1977.
23. Киттель Ч. Физика кристаллических диэлектриков. – М.: ИИЛ, 1978.
24. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982.
25. Нарасимхамурти Т. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. – М.: Мир, 1984.
26. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. – М.: Радио и связь, 1989.
27. Потапов А.А. Деформационная поляризация. Поиск оптимальных моделей. – Новосибирск: Наука, 2004.
28. Kingery W.D., Bowen H.K., Uhlmann D.R. Introduction to Ceramics. Second edition. – N.-Y.: John Willey and Sons, 1976.
29. Выдрик Г.А, Костюков Н.С. Физико-химические основы производства и эксплуатации электрокерамики. – М.: Энергия, 1971.
30. Третьяков Ю.Д. Керамика – материал будущего. – М.: Знание, 1987.
31. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. – М.: Наука, 1993.
32. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 1: Радиационная электропроводность. – М.: Наука, 2001.
33. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 2: ϵ и $\tan \delta$ при облучении. – М.: Наука, 2002.
34. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 3: Механическая и электрическая прочность и изменение структуры при облучении. – М.: Наука, 2003.
35. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 4: Герметичные кабельные вводы для АЭС. – М.: Наука, 2004.
36. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 5: Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. – М.: Наука, 2005.
37. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 6: Герметичные металлокерамические соединения. – М.: Наука, 2004.
38. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 7: Влияние трансмутантов на свойства керамических диэлектриков. – М.: Наука, 2007.
39. Диэлектрики и радиация / под общ. ред. Н.С. Костюкова. – Книга 8: Взаимодействие электромагнитного излучения с диэлектриками. – М.: Наука, 2011.
40. Еремин И.Е., Еремина В.В., Костюков Н.С., Оверчук В.А. Элементы параметрического синтеза линейной модели процесса упругой электронной поляризации // Информатика и системы управления. – 2003. – № 1(5). – С. 26-32.
41. Еремин И.Е., Еремина В.В., Уляхина Д.А. Метод расчета динамических параметров поляризационных процессов // Информатика и системы управления. – 2011. – № 3(29). – С. 60-69.
42. Еремин И.Е., Жилиндина О.В. Моделирование упругой электронной поляризации композиционных электрокерамик. I // Информатика и системы управления. – 2008. – № 1(15). – С. 28-38.
43. Еремин И.Е., Жилиндина О.В. Моделирование упругой электронной поляризации композиционных электрокерамик. II // Информатика и системы управления. – 2008. – № 3(17). – С. 27-33.

44. *Еремин И.Е., Жилиндина О.В.* Моделирование упругой электронной поляризации композиционных электрокерамик. III // Информатика и системы управления. – 2008. – № 4(18). – С. 11-20.
45. *Еремина В.В.* Систематизация математических моделей упругих видов поляризации воды. I // Информатика и системы управления. – 2007. – № 1(13). – С. 12-21.
46. *Еремина В.В.* Систематизация математических моделей упругих видов поляризации воды. II // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С. 78-89.
47. *Еремин И.Е., Жилиндина О.В.* Методика расчета экранирующих вкладов оптических электронов аниона кислорода // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2009. – № 4(15). – С. 17-24.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.С. Амосовым.

E-mail:

Еремина Виктория Владимировна – banysheva@mail.ru;

Жилиндина Ольга Викторовна – olgashest@mail.ru;

Подолько Евгения Александровна – evgpodolko@mail.ru.