

significant errors. The article considers electrodynamic interactions in parallel straight current-carrying conductors taking into account their finite length. Expressions for calculating interaction forces for different ratios between the bus length and the maximum transverse dimensions are obtained taking as an example buses laid in parallel to one plane.

Key words: electrodynamic forces, parallel lengths of conductors, mutual induction coefficients

REFERENCES

1. Neiman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki, t. 1* (Theoretical foundations of electrical engineering, vol. 1). Leningrad, Energoizdat, 1981, 536 p.
2. Kuznetsov I.F., Tsitsikyan G.N. *Elektrodinamicheskiye usiliya v tokovedushchikh chastyakh elektricheskikh apparatov i tokoprovodakh* (Electrodynamic forces in the current-carrying parts of electrical apparatus and conductors). Leningrad, Energoatomizdat, 1989, 176 p.
3. Aleksandrov G.N., Borisov V.V., Ivanov V.L. et. all. *Teoriya elektricheskikh apparatov* (Electrical apparatus theory). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1985, 312 p.
4. Meinke H.H., Gundlach F.W. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. — Berlin, Gottingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1962, 1642 p.

5. Youbok Lee. *Antenna Circuit design for RFID Applications*. — Microchip Technology, 2003, ANo. 710, pp. 1—49.

6. Clayton R. Paul. *Inductance: Loop and Partial*. — John Wiley and Sons, 2010.

7. Ezhov V.V., Tsitsikyan G.N. *Sudovaya elektrotekhnika i svyaz' — in Russ. (Marine electrical engineering and communication)*, 1992, No. 1(117), pp. 35—45.

8. Dvait G.B. *Tablitsy integralov i drugiye matematicheskiye formuly* (Tables of integrals and other mathematical formulas). Moscow, Publ. «Nauka», 1977.

9. Merkur'yev V.G., Tsitsikyan G.N. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1984, No. 5, pp. 62—64.

* * *

Электричество, 2016, № 11, с. 48—51.

Магнезиальная керамика — материал для космоса и атомной энергетики

КОСТЮКОВ Н.С., СОКОЛОВА С.М.

На основе теории вынужденных колебаний проведен расчет диэлектрических параметров магнезиальной керамики — перспективного материала для атомной и космической техники. Расчеты показывают, что для керамики MgO, обладающей кислородной проводимостью, все электротехнические параметры (γ , ϵ' , ϵ'' , $\text{tg}\delta$) в области поляризации при частотах до 10^{14} с^{-1} не противоречат экспериментальным результатам для зоны релаксации $R \approx 10^{-10} \div 4,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Такой размер области, как показано в [2], является реальным для кристаллических структур MgO. Вынужденные колебания при этом носят упругий резонансный характер и переходят в релаксационный режим колебаний при $R > 10^{-6} \text{ м}$.

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

Керамика на основе окиси магния обладает самыми высокими диэлектрическими свойствами, однако теряет их в атмосферных условиях из-за способности оксида адсорбировать воду. В условиях космического вакуума влияние влажности исключается и диэлектрические свойства сохраняются на высоком уровне. Материалы из окиси магния обладают высокой радиационной стойкостью и не теряют свойств при облучении.

Оксид магния (периклаз, жжёная магнезия) — химическое соединение (MgO) в виде белых кристаллов, не растворимых в воде, пожаро- и взрывобезопасен. Этот 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 $K_0 = 1$. Плотность $\rho = 3580 \text{ кг/м}^3$, область релаксации в керамике $R = 10^{-10} \div 10^{-6} \text{ м}$ в зависимости от технологии изготовления [1]. При длине волны $\lambda = 0,254 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ 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]:

$$\omega_0^2 = \frac{q^2}{\pi \epsilon_0 \epsilon_\infty R^3 m}, \quad (1)$$

где q — заряд; ϵ_0 — электрическая постоянная; m — масса.

Ниже приведены рассчитанные значения резонансной частоты иона кислорода [2] в зависимости от возможного значения зоны релаксации R :

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

Различия в значении зоны релаксации могут определяться технологическими параметрами производства керамики – дисперсностью помола, температурой обжига и др. При температуре 300 К удельная объемная электропроводность $\gamma_2 = 10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, следовательно, коэффициент затухания

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

где n_0 – число ионов кислорода, участвующих в проводимости;

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

Учитывая, что резонансная частота кислорода при изменении области релаксации R от $4,2 \cdot 10^{-10}$ 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, что колебания иона кислорода в керамике MgO носят упругий резонансный характер и диэлектрические характеристики описываются формулами для этой области [3].

Теоретически возможные значения диэлектрической проницаемости в зависимости от размера возможной зоны релаксации в области дисперсионных частот ($\omega \approx \omega_0$):

$$\varepsilon'_1 = 3,4 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 2,7 \cdot 10^{28} \cdot 3,14 \cdot 10^{-18} \right) = 3,4(1 + 5,652 \cdot 10^{10}) = 19,22 \cdot 10^{10}, \text{ при } R = 10^{-6} \text{ м};$$

$$\varepsilon'_2 = 3,4(1 + 5,652 \cdot 10^7) = 19,22 \cdot 10^7, \text{ при } R = 10^{-7} \text{ м};$$

$$\varepsilon'_3 = 3,4(1 + 5,652 \cdot 10^4) = 19,22 \cdot 10^4, \text{ при } R = 10^{-8} \text{ м};$$

$$\varepsilon'_4 = 3,4(1 + 5,652 \cdot 10^1) = 3,4 + 19,22 \cdot 10 = 195,6,$$

при $R = 10^{-9}$ м;

$$\varepsilon'_5 = 3,4(1 + 5,652 \cdot 10^{-2}) = 3,4 + 0,19 = 3,59,$$

при $R = 10^{-10}$ м.

По экспериментальным данным в этой области частот $\varepsilon' \approx 8 \div 12$.

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

$$\varepsilon'_6 = 3,4(1 + 418,75 \cdot 10^{-2}) = 3,4 + 14,2 = 17,6.$$

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

Для коэффициента диэлектрических потерь [4]

$$\varepsilon'' = \frac{2 n \alpha''}{3 \varepsilon_0} = \frac{2}{3} n \pi R^3 \varepsilon_\infty \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (3)$$

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

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

$$\varepsilon''_1 = \frac{2}{3} \cdot 2,7 \cdot 10^{28} \cdot 3,14 \cdot 10^{-18} \cdot 3,4 \frac{\omega}{6,325 \cdot 10^8} = 3,038 \cdot 10^2 \omega,$$

при $R = 10^{-6}$ м;

$$\varepsilon''_2 = 9,608 \cdot 10^{-3} \omega, \text{ при } R = 10^{-7} \text{ м};$$

$$\varepsilon''_3 = 3,038 \cdot 10^{-7} \omega, \text{ при } R = 10^{-8} \text{ м};$$

$$\varepsilon''_4 = 9,608 \cdot 10^{-12} \omega, \text{ при } R = 10^{-9} \text{ м};$$

$$\varepsilon''_5 = 3,038 \cdot 10^{-16} \omega, \text{ при } R = 10^{-10} \text{ м};$$

$$\varepsilon''_6 = 2,25 \cdot 10^{-14} \omega, \text{ при } R = 4,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Таким образом, в общем виде для любой частоты ω значение $\varepsilon''_6 = 2,25 \cdot 10^{-14} \omega$. При частоте $\omega = \omega_0$ значение $\varepsilon''_6 = 2,25 \cdot 10^{-14} \cdot 2,336 \cdot 10^{13} = 2,25 \cdot 2,336 \cdot 10^{-1} = 0,53$. В таблице приведены возможные значения диэлектрических характеристик магнезиальной керамики в зависимости от размера зоны релаксации R .

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

Выражение для коэффициента r при однократном отражении:

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

При $\varepsilon' = 17,6$; $\varepsilon'' = 0,53$;

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

$$\sqrt{2(\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}) + 1} = \sqrt{2(17,6 + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}) + 1} = \sqrt{2(17,6 + 17,61)} = \sqrt{70,42} = 8,39$$

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

Постоянная поглощения, выраженная через диэлектрические параметры:

Зона релаксации R , м	ε'	ε''	Уточнение значений R по результатам работы [2], $R=1,2 \cdot 10^{-10}$ м
10^{-6}	$19 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^2 \omega$	При этом R значение $\varepsilon'=17,6$
10^{-7}	$19 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^{-3} \omega$	Для $\varepsilon''=2,25 \cdot 10^{-14} \omega$; так как в области дисперсии $\omega=\omega_0=2,336 \cdot 10^{13}$, то $\varepsilon''=2,252,336 \cdot 10^{-1}=0,53$
10^{-8}	$19 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-7} \omega$	—
10^{-9}	195	$9,6 \cdot 10^{-12} \omega$	—
10^{-10}	3,59	$3 \cdot 10^{-16} \omega$	—
$4,2 \cdot 10^{-10}$	17,6	$2,25 \cdot 10^{-14} \omega$	—

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

Показатель поглощения, выраженный через диэлектрические параметры:

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

где λ — длина волны падающего света.

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

По полученным диэлектрическим закономерностям определяются оптические характеристики, важные для космического материаловедения, что позволяет экспериментальные результаты, полученные для материалов, применяемых в атомной энергетике, распространить на материалы для космоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будников П.П., Булавин И.А., Выдрик Г.А., Костюков Н.С. и др. Новая керамика. — М.: Стройиздат, 1969, 311 с.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No.11, pp. 48–51.

2. Еремин И.Е., Еремينا В.В., Костюков Н.С. Моделирование электронно-атомной структуры конденсированных диэлектриков: Научно-практическое издание. — Благовещенск: Изд. Амурского государственного университета, 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.

[15.02.2016]

Авторы: Костюков Николай Сергеевич окончил физико-математический факультет Воронежского государственного университета в 1949 г. В 1972 г. защитил докторскую диссертацию «Действие облучения на керамические электроизоляционные материалы» в Томском политехническом институте. Главный научный сотрудник Амурского государственного университета (АмГУ), г. Благовещенск.

Соколова Светлана Михайловна окончила химико-технологический факультет Томского политехнического института в 1989 г. В 2008 г. защитила кандидатскую диссертацию «Диэлектрические свойства керамических материалов и стеклопримесей для термоводов» в АмГУ. Научный сотрудник Института геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН, г. Благовещенск.

Magnesia Ceramics: Material for Space and Nuclear Power Engineering Applications

KOSTYUKOV Nikolai Sergeevich (*Amur State University, Blagoveshchensk, Russia*) — Chief scientific researcher, Dr. Sci. (Eng.)

SOKOLOVA Svetlana Mikhailovna (*Geology and Nature Institute of Far-East Branch of Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia*) — Scientific researcher, Cand. Sci. (Eng.)

The dielectric parameters of magnesia ceramics—a prospective material for nuclear and space engineering applications—are calculated based on the forced oscillation theory. The calculation results show that for MgO ceramics, which has oxygen conductivity, all electric engineering parameters (γ , ε' , ε'' and $\text{tg}\delta$) in the polarization region at frequencies up to 10^{14} s^{-1} do not contradict to the experimental results for the relaxation zone $R \approx 10^{-10} - 4.2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. As is shown in [2], such size of the zone is quite