

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ¹, Д. А. ЛАВРЕНЮК², Н. Я. ДЕРЕВЯНЧУК²

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества¹,
Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича²
E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

ЭФФЕКТ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В АНИЗОТРОПНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Рассмотрены особенности распределения электрического поля в анизотропной диэлектрической среде и установлены зависимости его продольной и поперечной составляющих от геометрических факторов. Впервые установлена возможность электростатической трансформации величины электрического поля и проанализированы основные методы ее оптимизации. Использование описанного эффекта позволит значительно расширить возможности практического применения рассмотренных электростатических явлений, приведет к появлению нового поколения приборов и устройств для СВЧ-техники, электроники и электроэнергетики.

Ключевые слова: анизотропия, диэлектрик, тензор, вектор, поляризация, электрическое поле, трансформатор, проницаемость.

Открытие явлений электромагнитной индукции (М. Фарадей, 1831 г.) и трансформации тока (Г. Румкорф, 1852 г.) обусловило появление новых научно-технических направлений, позволивших П. Яблочкову в 1876 году предложить и создать трансформатор. В настоящее время имеется большое количество различных конструктивных решений этого устройства, получивших широкое распространение в современной технике, чего нельзя сказать о явлении электростатической индукции, которое тоже известно достаточно давно [1, с. 135].

В данной работе исследованы особенности распределения электрического поля в анизотропных диэлектрических средах с целью выявления возможности преобразования его величины для создания нового принципа трансформации, что позволит значительно расширить практические возможности этого явления, особенно в областях электроники и энергетики.

Уравнение трансформации электрического поля

Рассмотрим анизотропную диэлектрическую среду, главные кристаллографические оси [1], [2], [3] которой совпадают с осями [1'], [2'], [3'] некоторой лабораторной системы координат. Тензор ее диэлектрической проницаемости представляется следующим образом [2, с. 89]:

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В случае создания из такой среды прямоугольной пластины размерами $a \times b \times c$, кристаллографические оси [1] и [2] которой размещены в плоскости боковой грани $a \times b$, а одна из этих осей находится

ся под некоторым углом α к ребру a (рис. 1), тензор приобретает вид

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \cos^2 \alpha + \epsilon_{22} \sin^2 \alpha & (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & \epsilon_{11} \sin^2 \alpha + \epsilon_{22} \cos^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

и характеризуется наличием продольной (ϵ_{\parallel}) и поперечной (ϵ_{\perp}) составляющих:

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{11} \cos^2 \alpha + \epsilon_{22} \sin^2 \alpha; \quad (3)$$

$$\epsilon_{\perp} = (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (4)$$

(В расчетах не учитываются краевые и граничные эффекты.)

Приложение к верхней и нижней граням $a \times b$ пластины некоторой разности потенциалов ΔU ведет к поляризации ее объема и возникновению как продольной (\vec{P}_{\parallel}), так и поперечной (\vec{P}_{\perp}) составляющих вектора электрической поляризации \vec{P} [3]:

$$\vec{P}_{\parallel} = \frac{\Delta U}{b} (\epsilon_{11} \cos^2 \alpha + \epsilon_{22} \sin^2 \alpha); \quad (5)$$

$$\vec{P}_{\perp} = \frac{\Delta U}{b} (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (6)$$

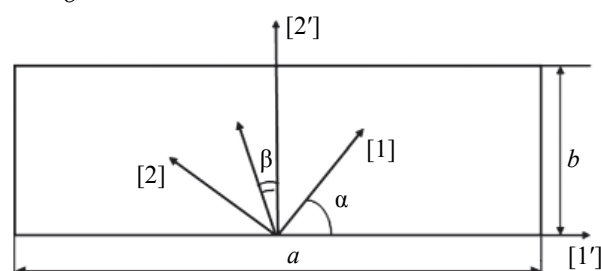


Рис. 1. Анизотропная диэлектрическая пластина (кристаллографическая ось [3] совпадает с лабораторной [3'], они расположены перпендикулярно плоскости рисунка)

Оптимизация значений величин (5) и (6) по углу α , для которого справедливо $\frac{\partial \vec{P}}{\partial \alpha} = 0$, $\frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial \alpha^2} < 0$, показала, что их максимум наблюдается при $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$.

В этом случае

$$\vec{P}_\perp = \frac{U}{2b}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}); \quad (7)$$

$$\vec{P}_\parallel = \frac{U}{2b}(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \quad (8)$$

и разность потенциалов ΔU_\perp между противоположными торцевыми гранями $b \times c$ пластины представляется следующим выражением:

$$U_\perp = \frac{U}{2b}(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})a. \quad (9)$$

Коэффициент трансформации n такого устройства определяется, с одной стороны, величиной отношения разности коэффициентов диэлектрической проницаемости ε_{11} и ε_{22} материала пластины к их сумме, с другой — коэффициентом его формы a/b [4]:

$$n = \frac{U_\perp}{U_\parallel} = \frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})a}{(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})b}. \quad (10)$$

Следует отметить, что рассматриваемый эффект позволяет трансформировать как постоянное, так и переменное электрическое поле.

Исследования также показали, что двухмерность электрической индукции \vec{P} обуславливается расположением эквипотенциальной поверхности поперечной составляющей электрического поля в объеме пластины под некоторым углом β к оси [2'] (рис. 1):

$$\beta = \arctg \frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}. \quad (11)$$

Коэффициент преобразования η материала пластины определяется отношением значений электрической энергии поперечного и продольного полей при значении тангенса угла диэлектрических потерь материала пластины, равному нулю и описывается выражением

$$\eta = \frac{U_\perp^2 C_\perp}{U_\parallel^2 C_\parallel} = \left[\frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^3}{(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})} \right], \quad (12)$$

где C_\parallel , C_\perp — поперечная и продольная составляющие электрической емкости пластины.

Оценка численных значений η для различных значений $m = \varepsilon_{11}/\varepsilon_{22}$ показала, что при $m \geq 60$ наблюдается насыщение функции и $\eta \approx 0,94$.

Некоторые конструктивные особенности анизотропного диэлектрического трансформатора

В общем случае выбор конкретной конструкции анизотропного диэлектрического трансформатора определяется условиями его эксплуатации [5]. Один из возможных вариантов этого устройства приведен на **рис. 2**. Основой его является прямоугольная пла-

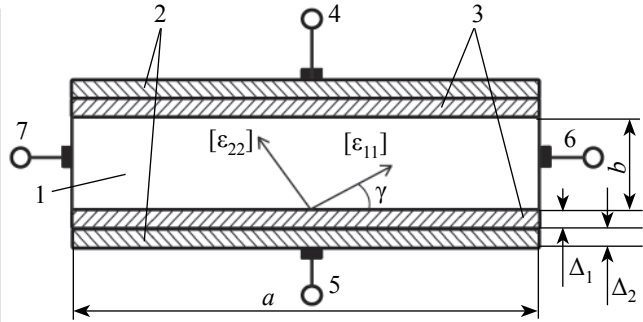


Рис. 2. Схематическая конструкция трансформатора на основе пластины (1) из анизотропного диэлектрика: 2 — диэлектрические слои; 3 — электропроводящие слои; 4, 5 и 6, 7 — соответственно, входные и выходные электрические выводы

стина I из анизотропного диэлектрического материала, кристаллографические оси которой расположены в плоскости боковой грани $a \times b$, при этом ось ε_{11} ориентирована под углом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ к стороне a . Верхняя и нижняя грани $a \times c$ этой пластины содержат диэлектрические слои 2 толщиной Δ_1 с диэлектрической проницаемостью ε_c . Их наружные стороны содержат электропроводящие слои 3 толщиной Δ_2 с входными электрическими выводами 4, 5. Выходные электрические выводы 6, 7 располагаются на противоположных торцевых гранях $b \times c$.

Такая конструкция трансформатора обеспечивает равномерную электрическую поляризацию объема пластины I и предохраняет трансформированную разность потенциалов ΔU_\perp от шунтирования электропроводящими слоями 3.

Анализ распределения электрического поля пластины I при ориентации кристаллографической оси под углом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ (рис. 1) показал, что наложение электропроводящих слоев 3 на верхнюю и нижнюю грани $a \times c$ ведет к некоторому искажению формы эквипотенциальных поверхностей в ее объеме, а следовательно, и к уменьшению коэффициента трансформации n . Если же ось расположить под углом $\gamma = \alpha_{\text{опт}} - \beta$ (рис. 2), то эквипотенциальные поверхности трансформированного электрического поля ΔU_\perp не искажаются и располагаются параллельно граням $b \times c$, а величина коэффициента трансформации такого устройства определяется выражением

$$n_1 = \frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma}{\varepsilon_{11} \cos^2 \gamma + \varepsilon_{22} \sin^2 \gamma} \cdot \frac{a}{b}. \quad (13)$$

Такое конструктивное решение практически устраняет влияние электропроводящих слоев на объемное распределение эквипотенциальных электрических поверхностей рассматриваемого трансформатора.

Эквивалентная схема электрического замещения этого устройства относительно электрических выводов 4 и 5 представляет собой три последовательно соединенных конденсатора C_1 , C_2 , C_3 (конденсаторы

C_1, C_3 образованы электропроводящим слоем 3 и поверхностью $a \times c$ с двух сторон пластины, C_2 — верхней и нижней поверхностями $a \times c$. При этом

$$C_1 = C_3 = \varepsilon_c \frac{ac}{\Delta_1}; \quad (14)$$

$$C_2 = 0,5(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \frac{bc}{a}. \quad (15)$$

Поскольку $\varepsilon_c \gg (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})$, $b \gg \Delta_1$, то $C_1 = C_3 \gg C_2$, а значит, практически вся разность потенциалов ΔU , подключаемая к электрическим выводам 4, 5, приложена непосредственно к верхней и нижней граням $a \times c$.

Трансформированная разность потенциалов ΔU_{\perp} возникает между торцевыми гранями $b \times c$ пластины, образующими выходную емкость $C_4 = C_{\perp}$, которая равна

$$C_4 = 0,5(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}). \quad (16)$$

В качестве материала пластины можно использовать как монокристаллические анизотропные диэлектрические материалы [6, с. 40], анизотропия коэффициентов диэлектрической проницаемости которых $\varepsilon_{11} / \varepsilon_{22} = 1,5—3$, так и искусственно анизотропных слоистых материалов с $\varepsilon_{11} / \varepsilon_{22} = 10^1—10^2$ [7, с. 728; 8, с. 228], методика расчета которых будет такой же.

Заключение

Проведенные исследования особенностей распределения электрического поля в анизотропных диэлектрических средах указывают на возможность преобразования его величины для создания нового принципа трансформации. Структурные элементы на основе анизотропных диэлектрических трансформаторов смогут найти широкое применение как в источниках электропитания различных электронных приборов, так и для согласования приемо-передающих систем радиолокации с антенными решетками сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Возможность одновременной транс-

формации постоянного и переменного электрического полей открывает перспективу их использования в устройствах одновременного компарирования, что позволит определять действующие значения напряжения тока, а также мощности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. Вихревой характер электрического поля в объеме пластины, обусловленный анизотропией коэффициента диэлектрической проницаемости, также создает предпосылки для появления новых принципов генерации электромагнитного излучения большой мощности в широком спектральном диапазоне. Частота генерации таких устройств будет определяться геометрическими размерами анизотропной пластины.

Таким образом, использование описанного эффекта трансформации позволит значительно расширить возможности практического применения рассмотренных электростатических явлений, что приведет к появлению нового поколения приборов и устройств для СВЧ-техники, электроники и электроэнергетики.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тамм И. Е. *Основы теории электричества*. Москва, Ленинград, ОГИЗ, 1946, 660 с.
2. Най Дж. *Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц*. Москва, Мир 1967, 286 с.
3. Ащеулов А. А. та ін. *Процес трансформації електричності*. Пат. №134213 України, 2019, бюл. № 9.
4. Ащеулов А. А. та ін. *Діелектричний трансформатор*. Пат. №135554 України, 2019, бюл. №13.
5. Тихомиров П. М. *Расчет трансформаторов*. Москва, Энергоиздат, 1986, 528 с.
6. Поплавко Ю. М., Переверзьева Л. П., Раевский И. П. *Физика активных диэлектриков*. Ростов-на-Дону, Издательство ЮФУ, 2009, 480 с.
7. Бабин В. П., Гудкин Т. С., Дашевский З. М. и др. Искусственно анизотропные термоземельные и их предельные возможности. *ФТП*, 1974, т. 8, № 4, с. 728–738.
8. Герашенко О. А., Иорданишвили Е. К., Губкин Т. С. и др. Датчики теплового потока на основе искусственно-анизотропных термоэлектрических материалов. *ИФЖ*, 1978, т. 35, № 2, с. 228–233.

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.05 2020 г.

DOI: 10.15222/TKEA2020.3-4.24

УДК 537.29

А. А. АЩЕУЛОВ¹, Д. А. ЛАВРЕНЮК², М. Я. ДЕРЕВ'ЯНЧУК²

Україна, м. Чернівці, ¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

ЭФФЕКТ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В АНІЗОТРОПНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Розглянуто особливості розподілу електричного поля в анізотропному середовищі і встановлено залежності поздовжньої і поперечної його складових від геометричних факторів.

Досліджено пластину прямокутної форми розмірами $a \times b \times c$, вибрані кристалографічні вісі якої розміщені в площині бокової грані $a \times b$, а одна з них орієнтована під деяким кутом α до ребра a . Показано, що прикладання до верхньої і нижньої граней деякої різниці потенціалів призводить до електричної поляризації об'єму пластини і появи поздовжньої і поперечної складових внутрішнього електричного поля. Досліджено можливість трансформації величини електричного поля і методи її оптимізації. Коефіцієнт трансформації такого пристрою визначається величиною анізотропії діелектричної проникності матеріалу пластини та її коефіцієнтом форми $k = a/b$. Запропоновано еквівалентну електричну схему розглянутого варіанту конструкції трансформатора.

Структурні елементи на основі анізотропних діелектричних трансформаторів зможуть знайти широке застосування як в джерелах електроживлення різних електронних приладів, так і для узгодження приймально-передавальних систем радіолокації з антенними решітками сантиметрового, міліметрового і субміліметрового діапазону довжини хвиль. Можливість одночасної трансформації постійного і змінного електричного полів відкриває перспективу їхнього використання в пристроях одночасного компарування, що дозволить визначати діючі значення напруги струму, а також потужності електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль. Вихровий характер електричного поля в об'ємі пластини, обумовлений анізотропією коефіцієнта діелектричної проникності, також створює передумови для появи нових принципів генерації електромагнітного випромінювання великої потужності в широкому спектральному діапазоні. Частота генерації таких пристроїв буде визначатися геометричними розмірами анізотропної пластини.

Використання описаного ефекту трансформації дозволить значно розширити можливості практичного застосування розглянутих електростатичних явищ, що призведе до появи нового покоління приладів та пристроїв для НВЧ-техніки, електроніки та електроенергетики.

Ключові слова: анізотропія, діелектрик, тензор, вектор, поляризація, електричне поле, трансформатор, проникність.

DOI: 10.15222/TKEA2020.3-4.24
UDC 537.29

A. A. ASHCHEULOV¹, D. A. LAVRENIUK², M. Ya. DEREVIANCHUK²

Ukraine, Chernivtsi, ¹Institute of Thermoelectricity under NAS and MES of Ukraine,
²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

ELECTRIC FIELD TRANSFORMATION EFFECT IN ANISOTROPIC DIELECTRIC MEDIUM

The authors consider the aspects of the electric field distribution in an anisotropic medium and establish how its longitudinal and transverse components depend on the geometric factors.

A rectangular plate of dimensions $a \times b \times c$ is studied, its selected crystallographic axes located in the plane of the side face ($a \times b$), while one of the axes is oriented at a certain angle α to the edge a . It is shown that applying a certain potential difference to the upper and lower faces electrically polarizes the volume of the plate and causes the appearance of the longitudinal and transverse components of the internal electric field. The authors investigate the possibility of transforming the magnitude of the electric field and methods for its optimization. The transformation coefficient of such a device is determined by the anisotropy of the dielectric permeability of the plate material and its shape coefficient $k = a/b$. The paper considers one of the design options for an anisotropic dielectric transformer and proposes its equivalent electrical circuit.

Structural elements based on anisotropic dielectric transformers may be widely used both in power supplies of various electronic devices and for coordination of radar transceiver systems with antenna arrays of centimeter, millimeter and submillimeter wavelength ranges. The possibility of simultaneous transformation of constant and alternating electric fields allows them to be used in devices of simultaneous comparison, enabling to determine the current values of voltage, as well as the power of electromagnetic radiation in a wide range of wavelengths. The vortex nature of the electric field in the plate's volume caused by the coefficient anisotropy of the dielectric permeability also creates the preconditions for the emergence of new principles for generating high-power electromagnetic radiation in a wide spectral range. The generation frequency of such devices is determined by the geometric dimensions of the anisotropic plate.

The use of the described transformation effect will significantly expand the possibilities of practical application of the considered electrostatic phenomena, which will lead to the emergence of a new generation of devices for microwave technology, electronics and electric power.

Key words: anisotropy, dielectric, tensor, vector, polarization, electric field, transformer, permeability.

REFERENCES

1. Tamm I. Ye. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow, Leningrad, OGIz, 1946, 660 p. (Rus)
2. Nye J. F. *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. Clarendon Press, 1957, 322 p.
3. Ashcheulov A. A. et al. Electricity transformation process. Pat. 134213 UA, 2019. (Ukr)
4. Ashcheulov A. A. et al. *Dielectric transformer*. Pat. 135554 UA, 2019. (Ukr)
5. Tikhomirov P. M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow, Energoizdat, 1986, 528 p. (Rus)
6. Poplavko Yu. M., Pereverz'yeva L. P., Rayevskiy I. P. *Fizika aktivnykh dielektrikov* [Physics of active dielectrics]. Rostov-on-Don, Publisher SFedU, 2009, 480 p. (Rus)
7. Babin V. P., Gudkin T. S., Dashevskiy Z. M. et al. Artificially anisotropic thermoelements and their ultimate capabilities. *FTP*, 1974, vol. 8, no. 4, pp. 728–738. (Rus)
8. Gerashchenko O. A., Iordanishvili Ye. K., Gubkin T. S. et al. Heat flow sensors based on artificially anisotropic thermoelectric materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1978, vol. 35, no. 2, pp. 228–233. (Rus)

Опис статті для цитування:

Ащеулов А. А., Лавренюк Д. А., Деревянчук Н. Я. Эффект трансформации электрического поля в анизотропных диэлектрических средах. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 3–4, с. 24–27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.24>

Cite the article as:

Ashcheulov A. A., Lavreniuk D. A., Derevianchuk M. Ya. Electric field transformation effect in anisotropic dielectric medium. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 3–4, pp. 24–27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.24>