

ИТОГИ

Из результатов моделирования следует, что заряженные частицы не попадают в заданный угол из-за искривления их траекторий магнитным полем.

Гамма кванты в условиях CMS попадают в заданный угол движения к оси кристалла вольфрамата свинца детектора и при ориентации оси кристалла эффект усиления развития электромагнитного ливня может быть замечен.

Следовательно, эффект ускорения развития электромагнитного ливня можно использовать для увеличения энергетического разрешения электромагнитного калориметра и уточнения расчета фона на эксперименте CMS.

Библиографические ссылки

1. *Baskov V. A.* Electromagnetic showers in aligned crystals // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 122, № 2. P. 194.
2. *Baskov V. A.* Electromagnetic cascades in oriented crystals of garnet and tungstate // Phys. Lett. B. 1999. V. 456, № 1. P. 86.
3. *Baurichter A.* Enhanced shower formation in aligned thick germanium crystals and discrimination against charged hadrons // Phys. B (Proc. Suppl.). 1995. V. 44, № 1–3. P. 79.
4. *Baurichter A.* Enhanced electromagnetic showers initiated by 20–180 GeV gamma rays on aligned thick germanium crystals // Nucl. Instr. Meth. B. 1999. V. 152, № 4. P. 472.
5. *Baryshevsky V. G.* On the influence of crystal structure on the electromagnetic shower development in the lead tungstate crystals // Nucl. Instr. Meth. B. 2017. V. 402. P. 35–39.
6. *Haurylavets V. V., Korjik M. V., Lobko A. S., Mechinsky V. A., Sytov A. I., Tikhomirov V. V.* Influence of a crystal scintillator structure on the energy resolution of a homogeneous electromagnetic calorimeter // Engineering of scintillation materials and radiation technologies. Minsk, 2016. P. 51–52.

ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СРЕД

Ф. М. Морозько

*Белорусский государственный университет, г. Минск;
fyodormorozko95@gmail.com;
науч. рук. – А. В. Новицкий, д-р физ.-мат. наук, проф.*

В работе формулируется метод эволюционных операторов для решения уравнений Максвелла в бианизотропных линейных средах с макроскопическими материальными параметрами, зависящими от времени. Приводятся пример применения метода к решению задачи нахождения коэффициентов временного отражения и преломления в случае скачкообразного изменения параметров.

Ключевые слова: уравнения Максвелла; операторный метод; нестационарные среды; бианизотропные среды.

ВВЕДЕНИЕ

Распространение электромагнитных волн в средах с зависящими от времени материальными параметрами – область исследования, которая привлекает все большее внимание в последнее время. Привнесение временной зависимости параметров среды предоставляет дополнительную степень свободы в изучении взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и расширяет возможности управления излучением. Среди эффектов, встречающихся в нестационарных средах, известны следующие: модуляция фазовой скорости [1], изменение временной и спектральной формы импульсов [2], временное отражение и преломление при скачкообразном изменении материальных параметров [3], временной эффект Фарадея [4] и двулучепреломление [5], появление запрещенных зон в пространстве волновых чисел во временных фотонных кристаллах [6].

Кроме того, излучение в нестационарной среде является неавтономной динамической системой и, следовательно, обладает рядом специфических свойств с точки зрения теории динамических систем. Среди прочих особый интерес представляет возможность создания условий, в которых происходит параметрическое усиление амплитуды поля (параметрический резонанс).

В теории слоистых сред хорошо зарекомендовал себя метод эволюционных операторов [7, 8], основанный на ковариантном подходе. В рамках операторного метода возможно описание распространения полей в линейных анизотропных средах наиболее общего типа – бианизотропных средах. При этом метод оказывается пригодным как для аналитических расчетов (в том числе точных и с применением теории возмущений [9]), так и для численных.

Ряд работ, опубликованных в последнее время, показывают интерес к исследованию электромагнитных волн в средах со сложной анизотропией [4, 5] и зависимостью параметров от времени. Однако насколько можно заключить, в литературе на данный момент не встречался общий подход, который бы позволил работать с произвольной анизотропией и временной зависимостью материальных параметров.

В настоящей работе предлагается метод, построенный по аналогии с операторным методом теории слоистых сред, для описания временной эволюции электромагнитных волн в нестационарных линейных недиспергирующих средах.

ФОРМУЛИРОВКА МЕТОДА

Рассматриваются уравнения Максвелла (скорость света в вакууме c предполагается равной единице)

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \frac{d\mathbf{D}}{dt}, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{d\mathbf{B}}{dt},\end{aligned}\tag{1}$$

в однородной среде с материальными уравнениями

$$\begin{aligned}\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \varepsilon(t)\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \alpha(t)\mathbf{H}(\mathbf{r}, t), \\ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \mu(t)\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) + \beta(t)\mathbf{E}(\mathbf{r}, t),\end{aligned}\tag{2}$$

где ε, μ – тензоры проницаемостей; α, β – псевдотензоры гирации.

Заметим, что уравнения (2) предполагают отсутствие дисперсии в среде.

Решения для уравнений (1) можно искать в виде плоских волн с переменной амплитудой

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{F}(t)e^{ik\mathbf{n}\cdot\mathbf{r}}.\tag{3}$$

Подставляя решения в виде (5) в уравнения Максвелла и учитывая материальные уравнения, можно сформулировать матричное эволюционное уравнение для амплитуд индуктивностей

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{D}(t) \\ \mathbf{n} \times \mathbf{B}(t) \end{pmatrix} = ik\mathbf{M} \begin{pmatrix} \mathbf{D}(t) \\ \mathbf{n} \times \mathbf{B}(t) \end{pmatrix},\tag{4}$$

где \mathbf{M} – блочная матрица 4×4 , в блоках которой находятся тензоры, содержащие материальные параметры.

Общее решение уравнения (4) выражается посредством эволюционного оператора, который связывает значения амплитуд в начальный момент времени t_0 с текущим моментом времени t

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D}(t) \\ \mathbf{n} \times \mathbf{B}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{P}(t, t_0) \begin{pmatrix} \mathbf{D}(t_0) \\ \mathbf{n} \times \mathbf{B}(t_0) \end{pmatrix}.$$

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ НА ВРЕМЕННОЙ ГРАНИЦЕ

Выбор индукций в качестве переменных в уравнении (4) обусловлен тем, что при таком выборе в матрицу \mathbf{M} не входят производные от материальных параметров и, следовательно, даже при скачкообразном изменении параметров среды индукции изменяются непрерывно. Данное обстоятельство позволяет сшивать решения уравнений на «временной границе». Временной границей [1, 3] называется некоторый момент времени, когда материальные параметры среды скачкообразно

изменяются, при этом до и после этого момента времени среда является стационарной.

В научной литературе [1, 3] показывается, что при прохождении временной границы происходит так называемое временное отражение и преломление. Иными словами, волну, существующую в среде после прохождения временной границы можно разделить на «прошедшую» и «отраженную». Для таких волн имеет место линейная связь между амплитудами индукций посредством тензора импедансов γ

$$n \times B_{r,t} = \gamma_{r,t} D_{r,t}. \quad (5)$$

$\gamma_{r,t}$ (индексы r и t обозначают отраженную и преломленную волны соответственно) являются решениями квадратного тензорного уравнения, коэффициенты которого строятся из параметров среды. Для негиротропных сред оказывается, что $\gamma_r = -\gamma_t$.

Пусть до некоторого момента времени t_0 среда характеризовалась тензорами ϵ_1 , μ_1 , а после скачка – тензорами ϵ_2 , μ_2 . Обозначим за γ_1 и γ_2 положительные ветви тензора импедансов в среде с индексом 1 и 2 соответственно. Тогда тензоры отражения и пропускания выразятся как

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{2}(I - \gamma_2^- \gamma_1), \\ t &= \frac{1}{2}(I + \gamma_2^- \gamma_1), \end{aligned} \quad (6)$$

где I – проективный тензор на плоскость нормальную к направлению распространения, а знак « $-$ » над тензором обозначает операцию псевдо-обращения [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описано построение операторного метода для решений уравнений Максвелла в нестационарных средах и рассмотрено его применение в случае со скачкообразным изменением параметров. В частности, получены тензорные коэффициенты временного отражения и пропускания.

В рамках метода, однако, возможно рассмотрение более общих задач с произвольными зависимостями материальных параметров от времени (при условии пренебрежимости дисперсии) и произвольной анизотропией.

Библиографические ссылки

1. *Morgenthaler F. R.* Velocity Modulation of Electromagnetic Waves // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1958. Vol. 6, № 2. P. 167–172.
2. *Xiao Y.* Spectral and temporal changes of optical pulses propagating through time-varying linear media // Opt. Lett. 2011. Vol. 36, № 4. P. 505–507.

3. *Xiao Y., Agrawal G. P.* Reflection and transmission of electromagnetic waves at a temporal boundary // *Optics Letters*. 2014. Vol. 39 (3). P. 574–577.
4. *Zhang R. Y.* Time Circular Birefringence in Time-Dependent Magnetoelectric Media // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. DOI: 10.1038/srep13673.
5. *Lin S. R.* Electromagnetic wave propagation in time-dependent media with antisymmetric magnetoelectric coupling // *Physics Letters A*. 2016. Vol. 380, № 33. P. 2582–2587.
6. *Zurita-Sanchez J. R.* Reflection and transmission of a wave incident on a slab with a time-periodic dielectric function $\varepsilon(t)$ // *Phys. Rev. A*. 2009. Vol. 79. P. 053821.
7. *Барковский Л. М., Фурс А. Н.* Операторные методы описания оптических полей в сложных средах. Минск, 2002.
8. *Borz dov G.* Frequency domain wave-splitting techniques // *J. Math. Phys.* 1997. Vol. 38. P. 6328–6366.
9. *Furs A. N., Alexeeva T. A.* Reflection and transmission of weakly inhomogeneous anisotropic and bianisotropic layers calculated by perturbation method // *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*. 2008. Vol. 41, № 6. P. 065203.

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ZRSiN, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

А. Д. Подобед

Белорусский государственный университет, г. Минск;

seregka_13@mail.ru;

науч. рук. – В. В. Углов, д-р физ.-мат. наук, проф.

Данная работа посвящена исследованию влияния концентрации кремния (структуры нанокompозита) и дозы облучения ионами He^+ с энергией 30 кэВ на процессы эрозии поверхности нанокompозитной пленки ZrSiN.

Ключевые слова: радиационный блистеринг; нанокompозитное покрытие; пострadiационный отжиг.

ВВЕДЕНИЕ

Образование блистеров (дефектов на поверхности материала в виде пузырей) при облучении ионами He^+ является одним из наиболее важных процессов, приводящих к изменению поверхностных физико-химических свойств и потере структурной целостности материала, что в конечном итоге ухудшает характеристики самого материала [1–2]. Под действием облучения ионами He^+ в пленках, как и в массивных материалах, формируются блистеры благодаря зарождению и росту газовакансионных кластеров [3]. Наличие дополнительных стоков (границ зерен) в покрытиях может существенным образом повлиять на механизмы, приводящие к образованию блистеров. Таким образом, формирова-