УДК 678

О. В. Савченко, В. А. Бабкин, А. В. Игнатов,
Г. Е. Заиков, О. В. Стоянов

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВОЛНОВОДОВ С ПЛАВНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Ключевые слова: композиционные волноводы, диэлектрическая проницаемость, уравнения Максвелла.

Для полного знания свойств композиционных планарных волноводов исследованы в замкнутом виде волноводы с плавным распределением диэлектрической проницаемости. На практике это позволяет надежно и достоверно рассчитывать различные устройства: ответвители, модуляторы, аттенюаторы и другие элементы оптической связи.

Key Words: composite waveguides, permittivity, Maxwell equations.

For a complete knowledge of the properties of composite planar waveguides investigated in closed form waveguides with a smooth distribution of the permittivity. In practice this allows you to securely and reliably calculated vat various devices: couplers, modulators, attenuatorsry and other elements of optical communication.

Цель работы

Многие устройства интегральной оптики могут быть выполнены на основе планарных диэлектрических волноводов как с плавными, так и со ступенчатыми профилями материальных характеристик.

Так как строгая аналитическая теория последних уже хорошо разработана, то для более полного знания свойств композиционных планарных волноводов необходимо исследовать в замкнутом виде волновод с плавным распределением диэлектрической проницаемости, которое, с одной стороны включало бы в себя известные профили, и с другой стороны могло приближаться к ступенчатому, что и является целью настоящей работы.

Методическая часть

В зависимости от конфигурации неоднородного диэлектрического волновода будем использовать для анализа и синтеза различные специальные системы криволинейных координат. Хотя в общем случае к ним относится и неортогональные системы координат, будет достаточным использование криволинейных ортогональных координат: прямоугольной, цилиндрической, эллиптической, конической и т.д.

В качестве основной ортогональной системы координат выбирем цилиндрическую систему координат. Прямоугольная система координат будет являться дополнительной системой, которая будет служить для нахождения связи представлений физических величин в локальной системе координат с таковыми в основной координатной системе.

При анализе и синтезе композиционных диэлектрических волноводов удобно использовать поперечные составляющие электрического и магнитного полей, так как тогда постоянная распространения волн имеется в дифференциальном операторе, но отсутствует в граничных условиях, а также позволяет в основных случаях свести векторную задачу к двум связанным (или несвязанным) скалярным.

Результаты исследований

В основной системе координат, когда имеется явная зависимость от угла φ $\exp(-jm\varphi)$, уравнения Максвелла распадаются на системы уравнений:

$$\frac{\partial^2 \breve{E}_\varphi}{\partial r^2} - \frac{d}{dr}\left\{\ln\left[q_1(r)r\right]\right\}\frac{\partial \breve{E}_\varphi}{\partial r} + q(r)\breve{E}_\varphi = -\frac{m\gamma}{\omega\varepsilon(r)r}\frac{d}{dr}\left\{\ln\left[q_1(r)\varepsilon(r)r^2\right]\right\}\breve{H}_\varphi$$

$$\frac{\partial^2 \breve{H}_\varphi}{\partial r^2} - \frac{d}{dr}\left\{\ln\left[q_2(r)r\right]\right\}\frac{\partial \breve{H}_\varphi}{\partial r} + q(r)\breve{H}_\varphi = -\frac{m\gamma}{\omega\mu_0 r}\frac{d}{dr}\left\{\ln\left[q_2(r)r^2\right]\right\}\breve{E}_\varphi \qquad (1)$$

где $q(r) = \omega^2\mu_0\varepsilon(r) - \gamma^2 - \left(m^2/r^2\right)$,

$$q_1(r) = \frac{m}{\omega\varepsilon(r)r^2} - \omega\mu_0,$$

$$q_2(r) = \frac{m^2}{\omega\mu_0 r^2} - \omega\varepsilon(r).$$

В развернутом виде система уравнений (1) представляется в виде:

$$\varepsilon(r)r^2\left[m^2 - \omega^2\mu_0\varepsilon(r)r^2\right]\frac{d^2\breve{E}_\varphi}{dr^2} + r\left[\omega^2\mu_0\varepsilon^2(r)r^2 + m^2 r\frac{d\varepsilon(r)}{dr} + m^2\varepsilon(r)\right]\frac{d\breve{E}_\varphi}{dr} +$$
$$+\left\{\left[\gamma^2\omega^2\mu_0\varepsilon^2(r) - \omega^4\mu_0^2\varepsilon^3(r)\right]r^4 + \left[2m^2\omega^2\mu_0\varepsilon^2(r) - \gamma^2\varepsilon(r)m^2\right]r^2 - m^4\varepsilon(r)\right\}\breve{E}_\varphi -$$
$$-m\gamma\omega r^2\left[2\mu_0\varepsilon(r) + r\mu_0\frac{d\varepsilon(r)}{dr}\right]\breve{H}_\varphi = 0,$$

$$(2)$$

$$r^2\left[\omega^2\mu_0\varepsilon(r)r^2 - m^2\right]\frac{d^2\breve{H}_\varphi}{dr^2} - r\left[\omega^2\mu_0 r^3\frac{d\varepsilon(r)}{dr} + \omega^2\mu_0\varepsilon(r)r^2 + m^2\right]\frac{d\breve{H}_\varphi}{dr} +$$
$$+\left\{\left[\omega^4\mu_0^2\varepsilon^2(r) - \gamma^2\omega^2\mu_0\varepsilon(r)\right]r^4 + \left[\gamma^2m^2 - 2m^2\omega^2\mu_0\varepsilon(r)\right]r^2 + m^4\right\}\breve{H}_\varphi +$$
$$+m\gamma\left[\omega r^3\frac{d\varepsilon(r)}{dr} + 2\omega\varepsilon(r)r^2\right]\breve{E}_\varphi = 0.$$

Система уравнений (1), (2) описывает распространение волн в однородных и неоднородных средах и приобретает конкретный вид при задании вида функциональных зависимостей $\varepsilon(r)$.

Во вспомогательной (дополнительной) системе координат получаем систему связанных волновых уравнений второго порядка:

$$\varepsilon(x,y)\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \varepsilon(x,y)\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \left[\omega^2 \mu \varepsilon^2(x,y) - \gamma^2 \varepsilon(x,y)\right] H_x - \frac{\partial \varepsilon(x,y)}{\partial y}\frac{\partial H_x}{\partial y} =$$
$$= -\frac{\partial \varepsilon(x,y)}{\partial y}\frac{\partial H_y}{\partial x}, \quad (3)$$
$$\varepsilon(x,y)\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \varepsilon(x,y)\frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \left[\omega^2 \mu \varepsilon^2(x,y) - \gamma^2 \varepsilon(x,y)\right] H_y - \frac{\partial \varepsilon(x,y)}{\partial x}\frac{\partial H_y}{\partial x} =$$
$$= -\frac{\partial \varepsilon(x,y)}{\partial x}\frac{\partial H_x}{\partial y}.$$

Уравнения Максвелла для плоских неограниченных в двух измерениях слоев распадаются на две независимые системы, описывающие распространение H и E волн. Полагая в них $E_y = Z(z)X(x)$, $H_y = \tilde{Z}(z)Y(x)$, получим уравнения:

$$\frac{d^2\tilde{Z}}{dz^2} + \gamma^2\tilde{Z} = 0, \quad \frac{d^2Y}{dx^2} + \gamma Y = 0,$$
$$\frac{d^2Z}{dz^2} + \left[\gamma^2 - \omega^2\mu_0\varepsilon(0)dz\right]Z = 0,$$
$$\frac{d^2X}{dx^2} + \left[\gamma^2 + \omega\mu_0\varepsilon(x)\right]X = 0,$$
$$\frac{d^2Y}{dx^2} - \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dx}\frac{dY}{dx} + \left[\gamma^2 + \omega\mu_0\varepsilon(x)\right]Y = 0,$$
$$\frac{d^2Z}{dz^2} - \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dz}\frac{dZ}{dz} + \left[\gamma^2 + \omega^2\mu_0\varepsilon(z)\right]Z = 0.$$

Характер изменения диэлектрической проницаемости в зависимости от параметров представлен на рис. 1.

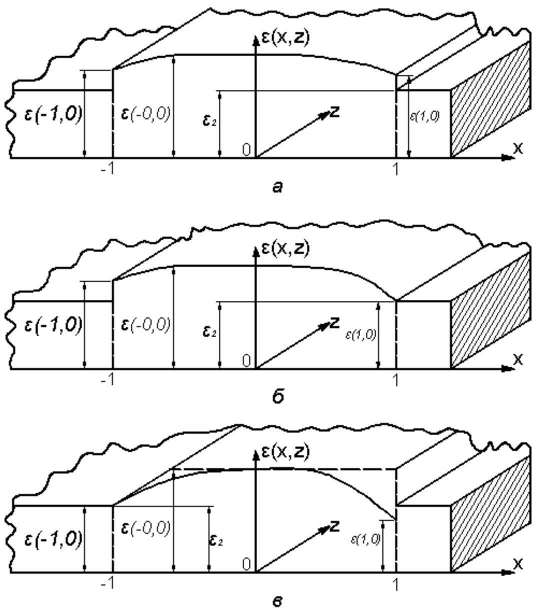

Рис. 1 – Характерные виды симметричных распределений ДП (диэлектрическая проницаемость) градиентного волновода

Литература

1. Савченко, О. В. К теории импульсных волн в композиционных структурах / О. В. Савченко [и др.] // Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и техн. приложения волновых процессов». – Н. Новгород, 2005. – С. 172.
2. Савченко, О. В. К теории распространения ультракоротких видеоимпульсов в планарных композиционных волноводах / О. В. Савченко, И. П. Руденок // Тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и техн. приложения волновых процессов». - Самара, 2006. – С. 27-28.
3. Савченко, О. В. О передаче и искажении оптических импульсов в активных планарных волноводах со сложной внутренней средой / О. В. Савченко, И. П. Руденок // Физика волновых процессов и радиотехн. системы. – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 33-38.
4. Савченко, О. В. Математическое моделирование распространения импульсов в волноводах/ О. В. Савченко // материалы IV Международная научно-техническая конференция «Информатизация процессов формирования открытых систем на основе САПР, АСНИ, СУБД и систем искусственного интеллекта», 29-30 июня 2007 г. – Вологда, 2007 – с.172-174.
5. Савченко, О. В. О распространении сигналов планарных композиционных структурах / О. В. Савченко, И. П. Руденок, А. И. Руденок // Физика волновых процессов и радиотехн. системы. – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 29-34.
6. Савченко, О. В. К теории оптических импульсов в композиционных структурах/ О. В. Савченко, И. П. Руденок// тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», 17-23 сентября 2007 г. - Казань, 2007 – с.16-17.
7. Савченко, О. В. Процессы переноса излучения в планарных и цилиндрических композиционных структурах на основе пространственных градиентных сред : дис. … канд. физ.-мат. наук / Савченко О. В. - Волгоград, 2007. – 162 с.
8. Савченко, О. В. Процессы переноса излучения в планарных и цилиндрических композиционных структурах на основе пространственных градиентных сред : автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук / Савченко О. В. - Волгоград, 2007. – 24 с.
9. Савченко, О. В. Сверхкороткие импульсы в структурах со сложной внутренней средой/ О. В. Савченко // Материалы научно-технической интернет-конференции СФ ВолгГАСУ «Энерго- и ресурсосбережение в строительной индустрии. Организационно-экономические и социальные проблемы хозяйствования в строительстве:», 1 июня 2010г., г. Михайловка Волгоградской обл./ Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. Волгоград: ВолгГАСУ, 2010 – с.207-209.
10. Савченко, О. В. Модели композиционных структур и волноводов на их основе/ О. В. Савченко // Материалы IV Российской научно-технической конференции с международным участием «Социально-экономические и технологические проблемы развития строительного комплекса региона. Наука. Практика. Образование:», Волгоград-Михайловка, 17-18 мая 2011г./ Волгоград: ВолгГАСУ, 2011 – с.310-313.
11. Савченко, О. В. Распространение коротких оптических импульсов в активных средах/ О. В. Савченко // Материалы II Российской научно-технической интернет-конференции «Состояние, проблемы и перспективы развития социально ориентированного строительного комплекса на региональном уровне», посвященной 10-летию Себряковского филиала

ВолгГАСУ и 60-летию ВолгГАСУ, Михайловка, 12 марта 2012г./ Волгоград: ВолгГАСУ, 2012 – с.170-173.
12. Савченко, О. В. О развитии теории оптических волноводов / О. В. Савченко // Материалы II студенческой научно-технической конференции «Инновационное развитие строительства Волгоградской области», Волгоград-Михайловка, 22 апреля 2013г./ Волгоград: ВолгГАСУ, 2013 – с.135-138.

© **О. В. Савченко** – к.ф.-м.н. доц. кафедры «Математических и естественно-научных дисциплин» Себряковского филиала Волгоградского государственного технического университета, sfmen12@yandex.ru; **В. А. Бабкин** – д-р хим. наук, проф., академик РАЕ (Российская академия естествознания), академик Международной академии «Контенант», нач. научн. отдела Себряковского филиала Волгоградского государственного технического университета; **А. В. Игнатов** — студент группы С-41д Себряковского филиала Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета, bartsimpson35@yandex.ru; **Г. Е. Заиков** – д-р хим. наук, проф., академик Международной академии наук (Мюнхен, Германия), заслуженный деятель РФ, Институт биохимической физики, РАН, Москва, chembio@sky.chph.ras.ru; **О. В. Стоянов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии пластических масс КНИТУ, stoyanov@mail.ru.

© **O. V. Savchenko** – Candidate of Physico-mathematical Sciences, professor of department “Mathematical and Natural Sciences” of Volgograd State Architecture Building University, Sebryakov’s Branch, sfmen12@yandex.ru; **V. A. Babkin** – Doctor of Chemical Sciences, professor, academician of international academy “Contenant”, Head of Science department of Volgograd State Architecture Building University, Sebryakov’s Branch, Babkin_v.a@mail.ru; **A. V. Ignatov** – 4th year student of class “S41-d”of Volgograd State Architecture Building University, Sebryakov’s Branch, Bartsimpson35@yandex.ru; **G. E. Zaikov** – Doctor of Chemical Sciences, professor, academician of international academyof Science (Munich, Germany), Honored scientist of Russian Federation. Institute of Biochemical Physics, Moscow, chembio@sky.chph.ras.ru; **O. V. Stoyanov** – Doctor of Engineering Sciences, professor of department “Technology of plastic masses” of KNRTU, stoyanov@mail.ru.