**Вычисление коэффициентов пропускания и отражения оптических волноводных фильтров с периодической модуляцией показателя преломления путём продолжения решения с одного периода**

***Горячук И.О.***

*м.н.с.*

*НИЦ «Курчатовский институт», Институт фотонных технологий Курчатовского комплекса Кристаллографии и фотоники, Москва, Россия*

*E-mail: io.gorjachuk@physics.msu.ru*

 Для создания узкополосных частотно-селективных фильтров в оптическом волноводе вдоль него записывают периодическую структуру (решётку Брэгга), т.е. привносят периодическую модуляцию показателя преломления и/или коэффициента экстинкции вдоль световода [1, 2]. На основе волноводных решёток могут быть изготовлены оптические коммутаторы с многоволновым уплотнением каналов и волноводные лазеры с распределённой обратной связью.

 Период *d* решётки Брэгга обычно подстраивают таким образом, чтобы она обеспечивала резонансное отражение света телекоммуникационного диапазона длин волн вблизи λ = 1550 нм, тогда как число штрихов *N* может достигать десятков тысяч, что помещается на длине *L* = 10 - 30 мм и обеспечивает спектральную ширину полосы непропускания ~ 0.1 нм. Теоретическое описание подобных периодических структур [2, 3] позволяет правильно подобрать глубину модуляции и точно определить длину волны резонансного отражения.

 Моделирование прохождения света через волноводный фильтр можно свести к описанию одномерного фотонного кристалла, представив его в виде *N* одинаковых последовательно соединённых элементов длины *d*. Пусть для каждого элемента известны комплексные амплитудные коэффициенты отражения слева () и справа (), а также пропускания (). Тогда эффективный показатель преломления  решётки (характеристические индексы Ляпунова  периодической системы) можно найти из уравнения:

 , (1)

где  - волновое число. Амплитудные коэффициенты отражения ,  и пропускания  структуры из *N* периодов определяются по следующим формулам:

 , , (2)

в которых комплексные параметры  и  имеют вид

 , . (3)

Заметим, что экспонента  в выражениях (2) и (3) описывает преобразование всех комплексных амплитуд полей при переходе между соседними штрихами решётки для каждого из двух самоподобных решений. Определяющая её формула (1) является квадратным уравнением.

 В проделанной работе было показано, что использование формул (1-3) при численном моделировании распространения излучения через оптический волновод с решёткой Брэгга позволяет существенно уменьшить время вычисления без потери физической интерпретации используемых величин и при сохранении достаточной точности численного моделирования. Для иллюстрации был выбран случай, допускающий точное аналитическое решение волновых уравнений, когда эффективный показатель преломления в области модуляции показателя преломления является кусочно-постоянной функцией координаты *y* вдоль волновода (прямоугольный профиль штриха решётки) [1].

 На Рис. 1 показана спектральная характеристика пропускания  рассмотренного фильтра на основе решётки из *N* = 50 штрихов с периодом d = 587.12 нм и глубиной модуляции диэлектрической проницаемости *Δε* = 0.05 (поглощение света отсутствует). Использовался неявный метод Рунге-Кутты второго порядка при численном нахождении решения на одном штрихе (чёрная тонкая кривая) или на всей решётке (серая кривая). Шаг численного интегрирования составлял 1/10000 от периода *d*. На Рис. 1 также представлено точное решение (жирная кривая).



***Рис. 1.*** Зависимость энергетического коэффициента пропускания *T* от длины волны λ для оптического волноводного фильтра на основе решётки Брэгга с прямоугольным профилем штриха, вычисленная тремя различными методами. На вставке показана зависимость вещественной части эффективного показателя преломления  от координаты *y*

 Таким образом, кривая пропускания оптического волноводного фильтра с решёткой Брэгга из *N* штрихов, полученная с использованием стандартных численных методов, хорошо согласуется с точным аналитическим решением (см. Рис. 1). Применение формул (1-3) почти не влияет на результат моделирования, однако существенно (в *N* раз) уменьшает время счёта, что может быть особенно важно в случае волноводных фильтров большой длины.

**Литература**

1. Морозов Г.В., Маев Р.Г., Дрейк Г.В. Точное аналитическое решение задачи об отражении электромагнитной волны от двухслойной периодической диэлектри-ческой структуры // Квантовая электроника. 1998. Т. 25, No. 11. С 1003–1008.
2. Соколов В.И., Панченко В.Я., Семиногов В.Н. Узкополосный брэгговский фильтр на длину волны 1.5 мкм на основе полимерного волновода с лазерно-индуцированной решеткой показателя преломления // Квантовая электроника. 2010. Т 40. No. 8. С. 739–742.
3. Yeh P., Yariv A. and Hong C.S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory\* // J. Opt. Soc. Am. 1977. V. 67, P. 423-438.