

Краткая инструкция по освоению программы МЕЕР

В. Пикулев, 2014

1. Общие сведения.

Meep – программа моделирования динамики электромагнитных полей, распространяющихся в структурах любой пространственной конфигурации, которая использует для расчётов *метод конечных разностей во временной области* (FDTD). В этом методе используется дискретная пространственно-временная сетка значений. Чем меньше временной и пространственный шаг, тем выше точность вычислений, при этом разработчики не вводят ограничений ни на размеры исследуемой структуры, ни на точность проводимых вычислений. Программа позволяет создавать модели распространения электромагнитных волн в одно-, двух и трёхмерных пространствах, анализировать эффекты дисперсии в электромагнитных полях, а также проводить расчеты для диэлектрических и магнитных материалов с нелинейными оптическими свойствами.

Разработчики *meep* – исследовательская группа Массачусетского технологического института (MIT) под руководством Стива Джонсона и Джона Джоаннопулоса. Программа является свободно распространяемой на условиях лицензии GPL. Программа предназначена для работы в среде Linux, формируя на основании командного файла с условием задачи файлы с результатами вычислений.

Посетите web-сайт разработчиков, где находится учебник и подробная инструкция по работе с программой:

http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Main_Page

2. Первый тестовый пример.

Запустите любой менеджер файлов (например, *mc*) в среде Ubuntu Linux, перейдите в каталог, выделенный для выполнения практических заданий, и создайте в нём папку с вашим именем. В этой папке создайте новый файл с именем *test1.ctl*, в котором напишите тестовую программу для расчёта распространения электромагнитной волны в сплошном горизонтальном волноводе. На рисунке чёрным показан волновод со значением диэлектрической проницаемости $\epsilon = 12$, серым – воздух ($\epsilon = 1$).



Оригинал примера можно найти здесь http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep_Tutorial

Далее приводится последовательность строк тестовой программы с необходимыми комментариями. В качестве языка для описания заданий на моделирование программа *meer* использует язык Scheme, являющийся разновидностью Lisp.

```
(set! geometry-lattice (make lattice (size 16 8 no-size)))
```

Так устанавливаются размеры области моделирования, в которой будет проводиться расчёт. Размерность указывается последовательно для осей X, Y, Z в условных единицах (для определённости будем считать их микрометрами). В нашем случае используется двумерное моделирование.

```
(set! geometry (list
  (make block (center 0 0) (size infinity 1 infinity)
    (material (make dielectric (epsilon 12)))))
```

Так строится волновод с $\epsilon = 12$. Он размещается симметрично центра расчётной области, ширина по координате Y составляет 1 мкм, по координате X влево и вправо уходит в бесконечность, по Z размер *infinity* указан условно. По умолчанию все части области, не заполненные геометрическими фигурами, будут иметь диэлектрическую проницаемость воздуха ($\epsilon = 1$).

```
(set! sources (list
  (make source
    (src (make continuous-src (frequency 0.15)))
    (component Ez)
    (center -7 0)))
```

Так создаётся точечный источник электромагнитной (синусоидальной) волны с фиксированной частотой, указанной в условных единицах (т.е. при нормировке $2\pi c = 1$, а значит, указанная частота соответствует длине волны $1/0.15 = 6.67$ мкм). «Component Ez» определяет выбор анализируемого компонента волны – вектора электрического поля, ориентированного перпендикулярно исследуемой поверхности. В силу незначительности эффекта составляющие магнитного поля волны часто не анализируются. Источник смещён от центра области расчёта на 7 мкм влево, при этом важно, чтобы он находился внутри расчётной области, но не на её границе.

```
(set! pml-layers (list (make pml (thickness 1.0))))
```

Настройка граничных условий существенно влияет на достоверность полученного результата. В данном случае граница рассчитывается по алгоритму PML (perfectly matched layers), при этом пограничный слой с толщиной 1 мкм поглощает падающую на него энергию электромагнитной волны. Важно, что толщина слоя отсчитывается от границы расчётной области *внутри* области – это следует учитывать при размещении внутри области геометрических объектов и источников электромагнитных волн.

```
(set! resolution 10)
```

Эта строка определяет точность пространственно-временных вычислений. То есть, размеры расчётного кластера в нашем случае будут 160x80 точек. Такими же будут и размеры изображений, генерируемые по результатам расчёта.

```
(run-until 200
          (at-beginning output-epsilon)
          (at-end output-efield-z))
```

Данный блок определяет особенности проведения вычислений по времени. Число 200 соответствует конечному времени моделирования (в условных единицах). Остальные аргументы определяют, какая информация будет записываться в выходные файлы.

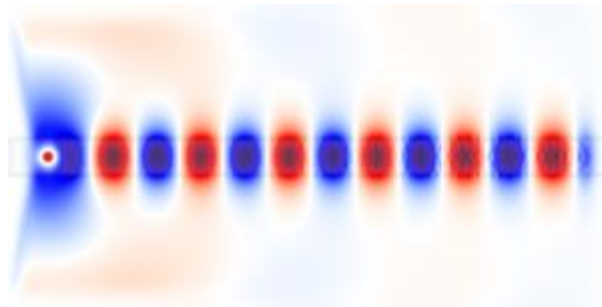
Текст программы написан. Теперь следует запустить программу на выполнение в терминале с помощью команды: **meep test1.ctl**, для профессионалов – **meep test1.ctl >& test1.out**. По истечении некоторого времени программа сформирует два выходных файла: *test1-eps-000000.00.h5* и *test1-ez-000200.00.h5*.

Для визуализации полученных результатов можно использовать любую программу, просматривающую формат h5. В качестве самого простого варианта можно выполнить следующую команду:

```
h5topng -S3 -Zc dkbluered -a yarg -A test1-eps-000000.00.h5 test1-ez-000200.00.h5
```

В этом случае будет создан файл с расширением *.png*, который можно просмотреть в любом графическом визуализаторе либо Интернет-браузере. Параметр **-S3** определяет увеличение масштаба результирующего изображения (в три раза). Параметр **-Zc dkbluered** устанавливает диапазон цветов, соответствующих величине электрического поля – от тёмно-синего (отрицательный по *Z* максимум) через белый (нуль) к красному

(положительный максимум). Параметры, следующие за $-a$, указывают, что файл *eps-000000.00.h5* будет подгружен как светло-серое (фоновое) изображение.



3. Второй тестовый пример.

Создайте файл *test2.ctl*, в котором будет написан код для расчёта динамической картины распространения электромагнитной волны в плоском, изогнутом под прямым углом волноводе с $\epsilon = 12$.

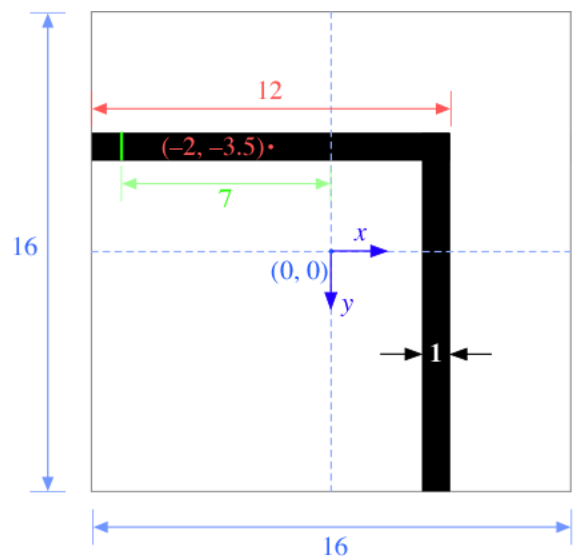
```
(set! geometry-lattice (make lattice (size 16 16 no-size)))

(set! geometry (list
  (make block (center -2 -3.5) (size 12 1 infinity)
    (material (make dielectric (epsilon 12))))
  (make block (center 3.5 2) (size 1 12 infinity)
    (material (make dielectric (epsilon 12)))))

(set! pml-layers (list (make pml (thickness 1.0))))
(set! resolution 10)
```

Геометрия волновода описана двумя командами *make block*, с указанием позиции центра для каждого из прямоугольников и длины их сторон. Структура всех приведённых выше блоков уже была рассмотрена в предыдущем примере.

Код, устанавливающий параметры источника электромагнитных волн (см. ниже), определяет позицию источника слева в горизонтальной части волновода, перед границей слоя PML. В отличие от предыдущего примера источник является вытянутым вдоль оси Y на 1 мкм. Кроме того, параметр *width* указывает на постепенное наращивание интенсивности колебаний источника, включённого в момент времени $t = 0$ в течение 20 единиц времени.



```
(set! sources (list
  (make source
    (src (make continuous-src
      (wavelength (* 2 (sqrt 12))) (width 20)))
    (component Ez)
    (center -7 -3.5) (size 0 1))))
```

Следует обратить внимание на запись формулы при указании длины волны электромагнитных колебаний – в языке Scheme используется т. н. «обратная польская запись» выражений: сначала идёт знак операции, потом – операнды. Выражение имеет вид $2\sqrt{12}$.

```
(run-until 200
  (at-beginning output-epsilon)
  (to-appended "ez" (at-every 0.6 output-efield-z)))
```

Выходные данные будут формироваться через каждые 0.6 единицы времени, и записываться в файл *test2-ez.h5*. Иными словами, результирующий массив данных будет иметь размерность $162 \times 162 \times 330$.

Запустите программу на выполнение: **meep test2.ctl**

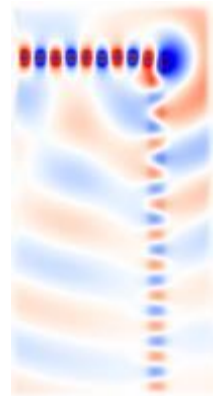
Создайте набор изображений по полученному файлу с результатами:

h5topng -t 0:329 -R -Zc dkbluered -a yarg -A test2-eps-000000.00.h5 test2-ez.h5

Опция *-t 0:329* формирует 330 изображений для каждой точки по оси времени. Эти файлы будут размещены в вашем рабочем каталоге, но для просмотра динамики распространения волны они малопригодны. Поэтому соберём эти изображения в анимированный *.gif* следующим образом:

convert ez.t*.png ez.gif

Полученный файл лучше всего просматривать в Интернет-браузере. Не нужные более *.png* – изображения можно удалить.



4. Пояснения к моделированию фотонных кристаллов.

При выполнении практических заданий следует использовать модель двумерного фотонного кристалла, предполагающую наличие либо стержней, либо отверстий бесконечной высоты, пересекающих плоскость, в которой осуществляется моделирование.

Наличие дефекта в фотонном кристалле может привести к появлению локальных фотонных разрешённых уровней. Одиночный дефект в модели двумерного фотонного

кристалла можно создать удалением одного стержня, изменением его формы и размера, и изменением значения диэлектрической проницаемости вещества, составляющего стержень.

Некоторые полезные фрагменты программ по расчётам распространения электромагнитной волны в фотонных кристаллах:

```
(define mat1 (make dielectric (epsilon eps1)));создаем диэлектрик mat с e=1
(define mat2 (make dielectric (epsilon eps2)));создаем диэлектрик mat с e=13

(set! geometry-lattice (make lattice (size lx ly no-size))) ;Задаем размеры
расчетной области
(set! geometry (list(make block (center 0 0) (size infinity infinity
infinity) (material mat1)))) ; Заполняем расчётную область диэлектриком mat

;Цикл по созданию отверстий в диэлектрике (материал - воздух)
(do ((x dmin (+ x ds)) (> x dmax))
  (do ((y dmin (+ y ds)) (> y -0.6))
    (if (not (eqv? y 0))
      (set! geometry (append geometry(list
      (make block (center x y) (material mat2) (size h h infinity) )
      )))
    )
  )
)
```

5. Описание практических заданий.

Первое задание – общее: Протестировать эффект прохождения волны в двумерном фотонном кристалле без дефектов. Размер фотонного кристалла не менее 10x10 ячеек. Представить программу и анимацию.

Второе задание – по вариантам:

- 1) Создать волновод в фотонном кристалле с поворотом излучения на 90° путём изменения значений диэлектрической проницаемости для некоторых стержней. Диэлектрическую проницаемость среды принять равной единице. Промоделировать эффект распространения волны в созданном волноводе.
- 2) Создать волновод в инвертированном фотонном кристалле с поворотом излучения на 90° путём изменения значений диэлектрической проницаемости для некоторых стержней. Диэлектрическую проницаемость среды принять равной 12. Промоделировать эффект распространения волны в созданном волноводе.
- 3) Создать два параллельных волновода в фотонном кристалле путём изменения значений диэлектрической проницаемости для некоторых стержней. Волноводы должны

находиться друг от друга на расстоянии 2-3 периодов решётки кристалла. Промоделировать эффект переноса излучения из одного волновода в другой.

- 4) Создать два параллельных волновода в фотонном кристалле путём изменения значений диэлектрической проницаемости для некоторых стержней. Волноводы должны находиться друг от друга на расстоянии 3-4 периодов решётки кристалла. Промоделировать эффект переноса излучения из одного волновода в другой путём введения одного или нескольких «дефектов» в середине фотонного кристалла между волноводами.

По полученным результатам требуется представить сводную таблицу проведённых экспериментов, текст программы и наиболее интересные анимации.
