

Tutorial——波导耦合效果比较

Platform

OS: Ubuntu-20.04

Programming: Python 3.8

Libraries: MIT MEEP

建模方法（以绝热耦合情况为例说明）

理论根据

提出绝热耦合（同一能态对应的简并本征态之间的“绝热”转化）的文章：

Adiabatic three-waveguide directional coupler

Emmanuel Paspalakis

Department of Materials Science, School of Natural Sciences, University of Patras, Rio, Patras 265 04, Greece

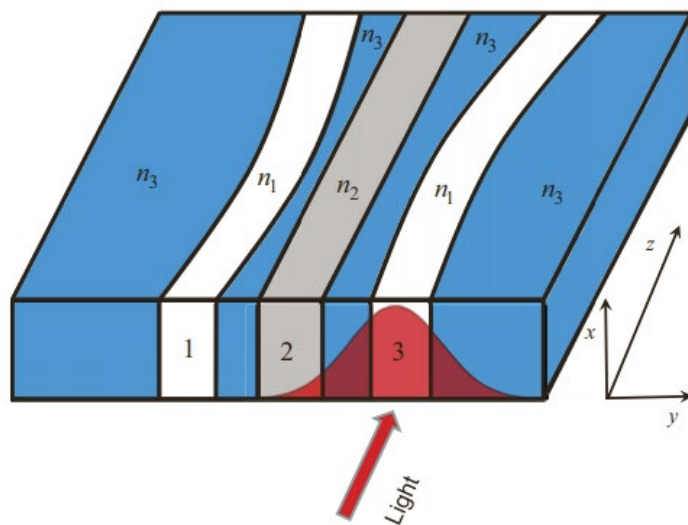
Received 31 January 2005; received in revised form 21 July 2005; accepted 25 July 2005

$$|\psi_{\text{dark}}(z)\rangle = \frac{1}{\sqrt{k_{12}^2(z) + k_{23}^2(z)}} \begin{bmatrix} k_{23}(z) \\ 0 \\ -k_{12}(z) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

This can be also written as

$$|\psi_{\text{dark}}(z)\rangle = \cos[\Theta(z)]|1\rangle - \sin[\Theta(z)]|3\rangle, \quad (7)$$

where $\tan[\Theta(z)] = k_{12}(z)/k_{23}(z)$, and $|1\rangle = (1, 0, 0)^T$, $|2\rangle = (0, 1, 0)^T$, $|3\rangle = (0, 0, 1)^T$. This eigenstate is called a dark state of the system. Such states exist in laser-driven multi-level systems as well and have led to several interesting effects [15].



（该图仅作示意，其符号标记与程序定义不尽相同）

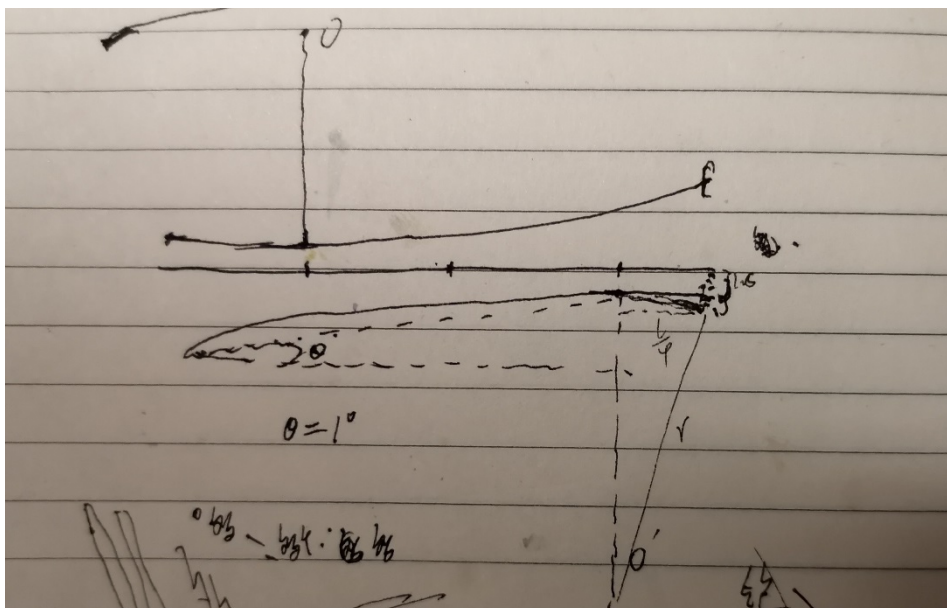
程序定义过程

Meep 的方便之处在于为用户提供了统一便捷的各种函数、类的接口，不难根据其原理进行如下的建模过程。

表 1：主要参数说明

参数名	含义	默认定义值
Core_eps	芯层介电常数	4.0
Clad_eps	包层介电常数	2.25
Theta	弯曲角度（如下图所示）	1 degree
Bend_r	1、3 号波导曲率半径（因为外波导是基于 meep 中 Cylinder 类）	根据 theta、s_len、width 等值计算得到
S_len	波导长度	
Width	波导宽度	1
Separation	波导间距（以各中心为基准）	1.5

1. 构建几何结构（根据下图）



- Cell 类创建整个计算单元
 - 整个 cell 单元大小区域内利用 Block 类设置 $\epsilon=2.25$ 的包层折射率介质填充
 - 中间 2 号波导利用 Block 类定义, $\epsilon=4.0$, 长 s_len , 宽 $width$, 中心即区域内左边原点
 - Cylinder 类定义弯曲波导, 以下面的 1 号波导为例, 利用上图示意计算出的 $bend_r$ 值和圆心横纵坐标值, 定义 $bend_r+width/2$ 的 $\epsilon=4.0$ 的 Cylinder, 再定义 $bend_r-width/2$ 的 $\epsilon=2.25$ 的 Cylinder 即实现了弯曲的 1 号波导 (圆心横坐标对应 2 号波导右侧四等分点), 上面的 3 波导定义类似; 而后利用两个 $\epsilon=2.25$ 的 Block 类 “切去” 左右两侧的弯曲波导多余部分。
2. 定义波源, 波源具有 y 向宽度 (计算功率谱是波源的空间宽度一般是必要的)



(波源位置: 1 波导最左端)

单频连续波具体的空间参数:

$$src_x = -s_len / 2$$

$$src_y = -3 * s_len / 4 * np.tan(theta) - separation$$

$$size = mp.Vector3(0, width, 0)$$

3. 定义需要计算的物理量 (以下仅显示计算相应物理量所在的空间区域, 最终的定义都在 Simulation 类的 run 方法中传入相应的组合参数)

- a) 1、3 波导端点处 dpwr（用作图示）

```
point_end_1 = mp.Vector3(s_len / 2 - 1, -s_len / 4 * np.tan(phi) - separation)

point_end_3 = mp.Vector3(s_len / 2 - 1, 3 * s_len / 4 * np.tan(theta) + separation)
```

- b) 1、3 波导端面处 dwpr（用作更准确的功率密度比例计算）

```
volume_end_1 = mp.Volume(center=point_end_1, size=mp.Vector3(0, width, 0))

volume_end_3 = mp.Volume(center=point_end_3, size=mp.Vector3(0, width, 0))
```

- c) 全局 dpwr、折射率等用作生成动态图示

```
volume_all = mp.Volume(center=mp.Vector3(), size=cell)
```

4. 构造 Simulator 类，运行生成数据文件

- a) 运行代码示例（一些参数意义参考下文“耦合结构”部分）

```
sim.run(mp.at_beginning(mp.in_volume(mp.Volume(center=mp.Vector3(), size=cell), mp.output_epsilon)),

        mp.to_appended('ey', mp.at_every(10, mp.in_volume(volume_all, mp.output_efield_y))),

        mp.to_appended('dpwr', mp.at_every(10, mp.in_volume(volume_all, mp.output_dpwr))),

        mp.to_appended('dpwr-pt-1', mp.at_every(1, mp.in_point(point_end_1, mp.output_dpwr))),

        mp.to_appended('dpwr-pt-3', mp.at_every(1, mp.in_point(point_end_3, mp.output_dpwr))),

        mp.to_appended('dpwr-vol-1', mp.at_every(1, mp.in_volume(volume_end_1, mp.output_dpwr))),

        mp.to_appended('dpwr-vol-3', mp.at_every(1, mp.in_volume(volume_end_3, mp.output_dpwr))),

        until=700)
```

- b) 生成的数据文件

```
-rw-r--r-- 1 rose rose 9.5K Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr-pt-1.h5

-rw-r--r-- 1 rose rose 9.5K Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr-pt-3.h5

-rw-r--r-- 1 rose rose 70K Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr-vol-1.h5

-rw-r--r-- 1 rose rose 70K Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr-vol-3.h5

-rw-r--r-- 1 rose rose 216M Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr.h5

-rw-r--r-- 1 rose rose 3.1M Oct 17 00:58 adiabatic-eps-000000.00.h5
```

5. Meep 的配套软件包 h5utils 以及自编的一些 python 脚本进行批处理、可视化等

- a) 动态 GIF 生成，h5ls 命令显示 h5 数据文件的维度（时域上是 70 个数据记录），经以下命令便生成了文件夹中的 GIF 动图，展示出绝热耦合的动态过程

```
$ ls adiabatic*h5 -hl
```

```
-rw-r--r-- 1 rose rose 9.5K Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr-pt-3.h5
```

```

-rw-r--r-- 1 rose rose 70K Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr-vol-1.h5
-rw-r--r-- 1 rose rose 70K Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr-vol-3.h5
-rw-r--r-- 1 rose rose 216M Oct 17 00:58 adiabatic-dpwr.h5
-rw-r--r-- 1 rose rose 3.1M Oct 17 00:58 adiabatic-eps-000000.00.h5

$ h5ls adiabatic-dpwr.h5

denenergy          Dataset {2100, 192, 70/Inf}

denenergy          Dataset {2100, 192, 70/Inf}

$ h5topng -t 0:70 -R -Zc dkbluered -a yarg -A adiabatic-eps-000000.00.h5
adiabatic-dpwr.h5

$ convert adiabatic-dpwr*.png adiabatic-dpwr.gif

```

- b) 其他的 python 脚本用于绘制端点处时域上 dpwr 变化曲线和计算耦合比率，都是首先利用 h5totxt 命令将 h5 数据文件转换为 csv 文本文件，再利用 python 的科学计算程序库进行数据处理和可视化

常规耦合器结果



该图为某时刻功率密度的空间分布，文件夹中另有 GIF 动图可供参考。

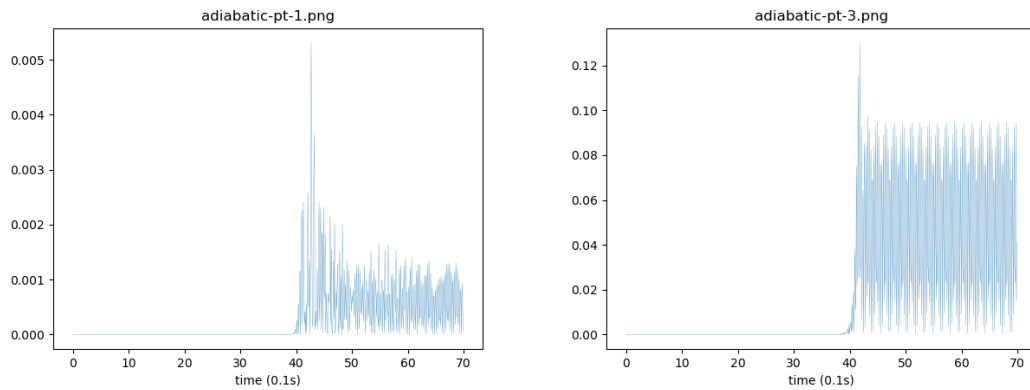
显然，两间距恒定的波导即常规耦合条件下，最终功率密度分布区域稳态平衡值，从较大空间范围来看，两波导上该值是 1:1，无需计算，这同理论分析相一致。即便稍微标动间距、折射率等参数，只要耦合的上，最终（波导足够长的情况下）该比值应该是严格的 1:1，两波导不再有区别。

绝热耦合器





下面两图分别为以上标记的两点处在时域上的 dpwr 大小变化，从而能够估计波导 1 端点的 dpwr 与波导 3 端点的 dpwr 大致为 0.01。



（注意两图的纵坐标大小）

以下更准确的计算表面该比值为 0.011（理想的绝热耦合下该值为 0）。计算时，将两“端面”的时域 dpwr 数据（一个二维数组数据，并只取 450s 后稳定状态的数据作计算）分别求和再作比值。

```
base@DESKTOP-N56V87H:~/mnt-e-linux-wsl/it-work/phcs-1014$ python transmission-computing.py -h1 adiabatic-dpwr-vol-1.h5 -h2 adiabatic-dpwr-vol-3.h5 -st 450
shape: (12, 250)
shape: (12, 250)
The ratio of dpwr: 0.011445467914626438
```

扰动影响

芯层折射率变动，其余值保持默认，但需要保证大于包层介电常数 2.25，因为没有芯折射率小于外周折射率的波导，那样做没有意义。由于外周折射率为 2.25，故而 core_epsilon 与其相差越大的情况下，波导对光子的局域性更强，波导间的耦合越弱，绝热耦合效应减弱，该比值升高。

Core epsilon value	DPWR Ratio
3.0	0.004
4.0	0.011
5.0	0.22

波导间距变动，其余值保持默认。可见间距太大会降低耦合，该值升高；间距太小虽然增强

耦合，也可能会绝热条件的近似性降低，该值同样可能增加。

Separation	DPWR Ratio
1.0	0.015
1.5	0.011
2.0	0.16