

实验四 CST 仿真软件学习

实验目的

- a) 学习使用 3D electromagnetic simulation software CST;
- b) 掌握电磁学仿真的基本设置及绘制图形的方式;
- c) 掌握仿真结果的检验方法;
- d) 学习用CST搭建矩形波导, 并进行仿真实验
- e) 了解传输线与波导相关性质

学习 CST 软件的基本操作

CST, 三维电磁场仿真软件。CST 工作室套装®是面向 3D 电磁、电路、温度和结构应力设计工程师的一款全面、精确、集成度极高的专业仿真软件包。包含八个工作室子软件, 集成在同一用户界面内, 为用户提供完整的系统级和部件级的数值仿真优化。软件覆盖整个电磁频段, 提供完备的时域和频域全波电磁算法和高频算法。典型应用包含电磁兼容、天线/RCS、高速互连 SI/EMI/PI/眼图、手机、核磁共振、电真空管、粒子加速器、高功率微波、非线性光学、电气、场路、电磁-温度及温度-形变等各类协同仿真。

课上实验内容（在实验室完成，包含 part1&2）

Part 1 反射系数折射系数仿真

a) 新建 project:

MW&RF&OPTICAL——Antennas——next——waveguide——next——Time domain——next——注意单位(mm 和 GHz 其他为默认值)——Next——finish

SPACE 使结构最佳视窗

SHIFT+SPACE 使被选择物体最佳视窗

SHIFT+左键 平面内旋转视图

CTRL 任意旋转视图

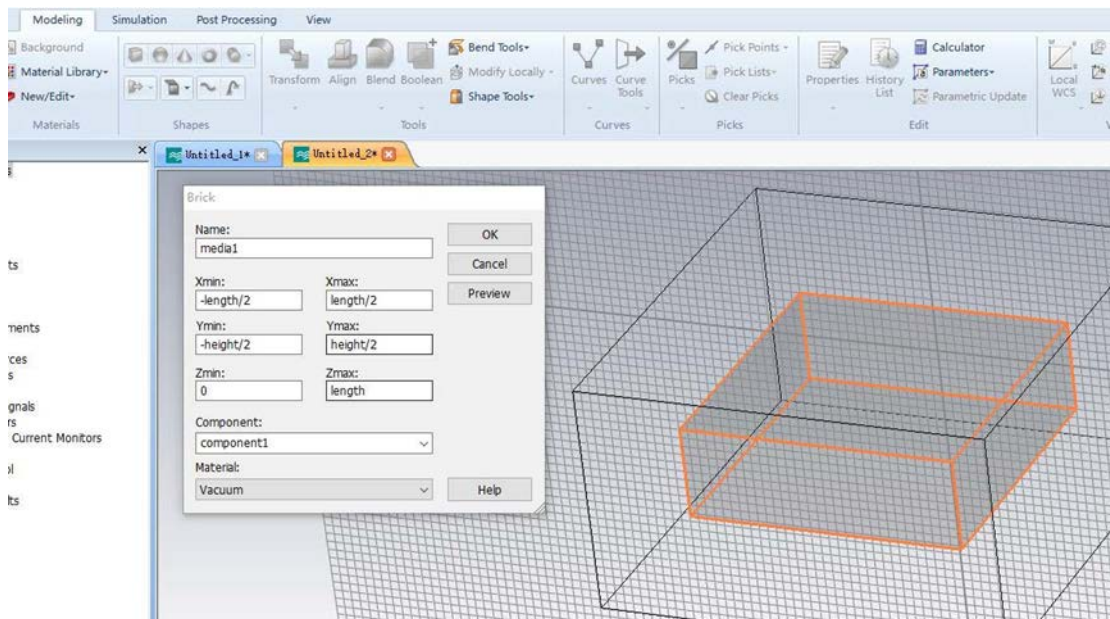
SHIFT+CTRL 平移视图

b) 从无损材料入射到无损材料

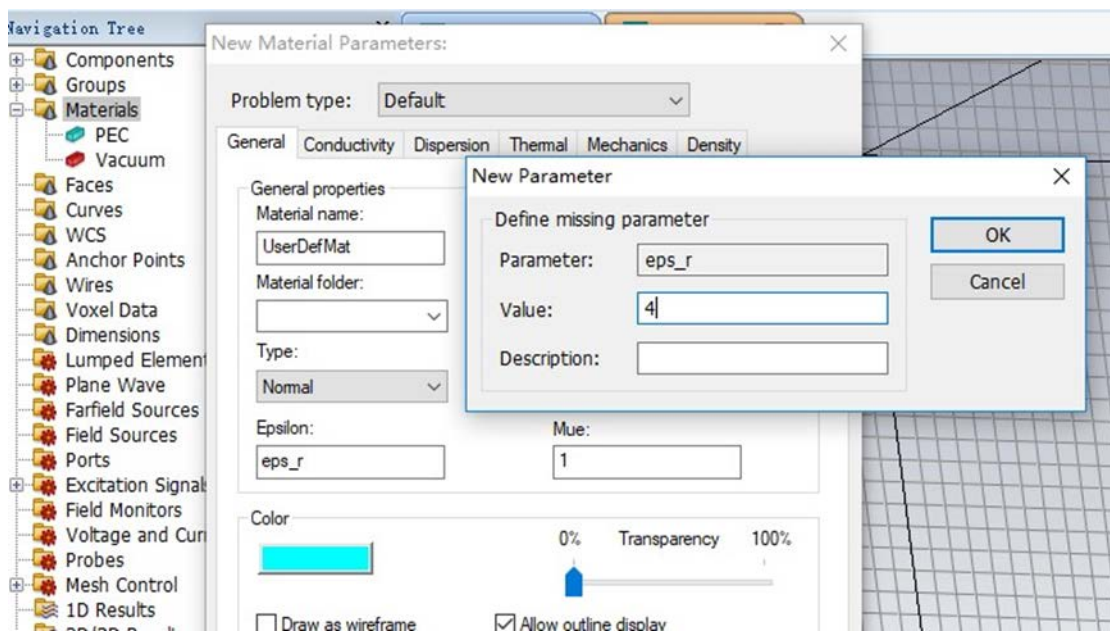
1) 在 parameter list 中设置实验所需参数, λ 为波长, frequency 为实验频率, height 为立方体高度, length 为立方体变长。(c_light 为软件内置参数)

Name	Expression	Value	Description	Type
frequency	= 1e9	1e9		Undefined
lambda	= c_light/frequency*1e3	299.792458		Undefined
height	= 100	100		Undefined
length	= 1*lambda	299.792458		Undefined
<- new parameter ->				

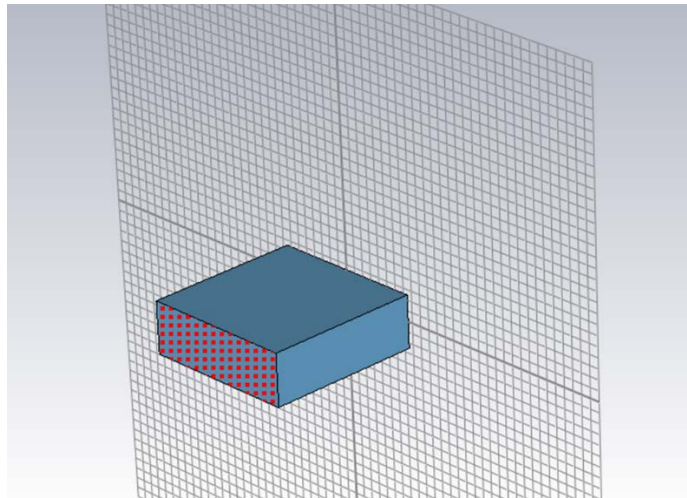
2) 点击 Modeling—Shapes 中的立方体, 按键盘 Esc 键进入设置, 设置参数如图。Preview 可以预览图像, 点击 OK 保存设置。



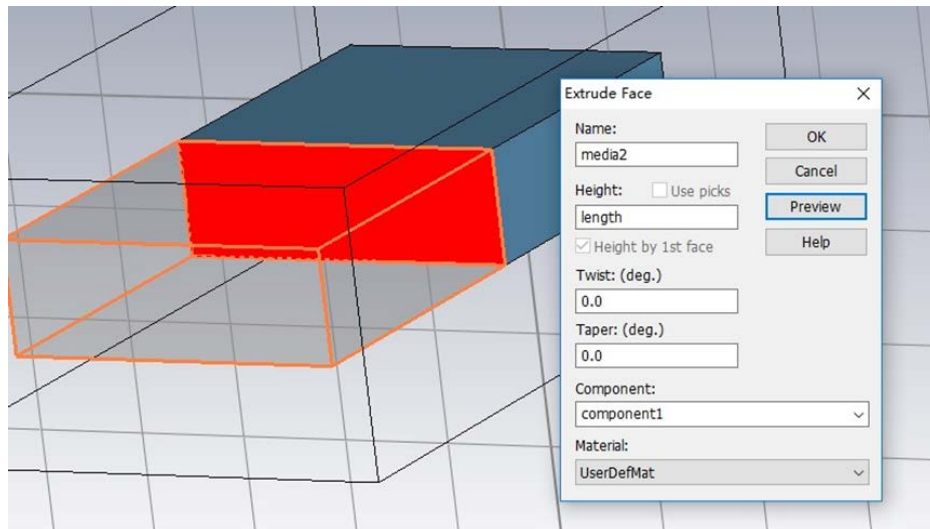
3) 右键左侧边栏中的 Materials, 选择 New Material, 设置 Epsilon 为 eps_r, 并设置其参数值如图。



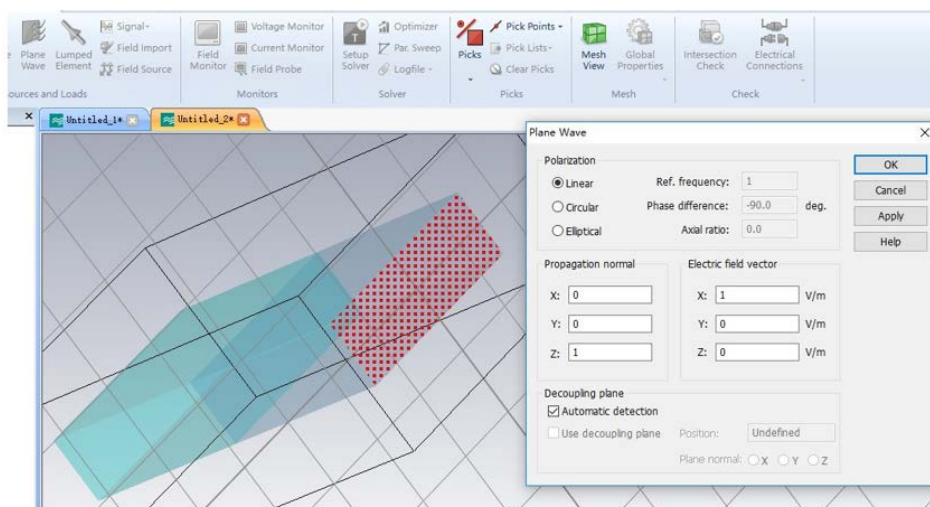
4) 点击 Simulation 中 Picks, 选择图中位于 xy 平面的面并双击



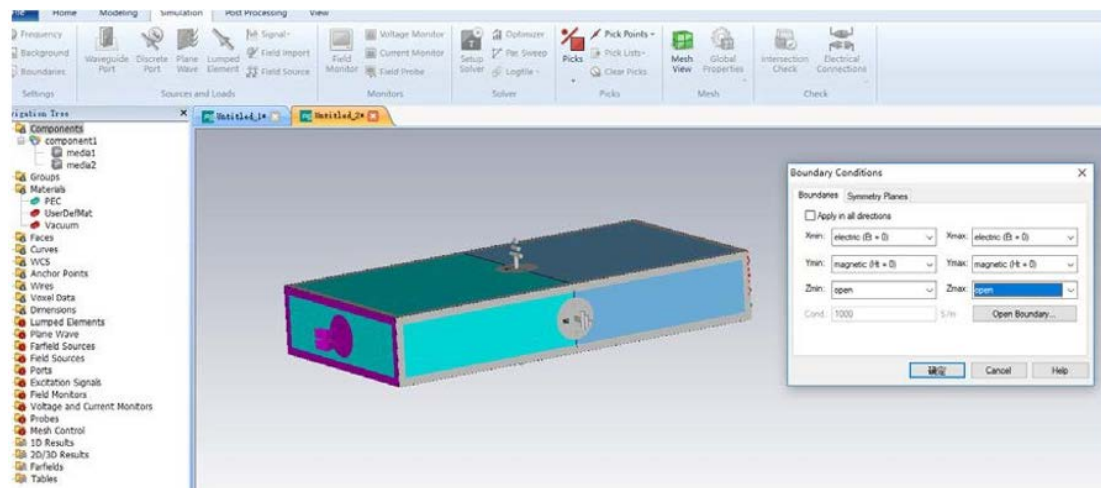
5) 点击 Modeling—Shapes—Extrusions, 设置参数如下图, 注意材料改为 UserDefMat。
Preview 无误后点击 ok。



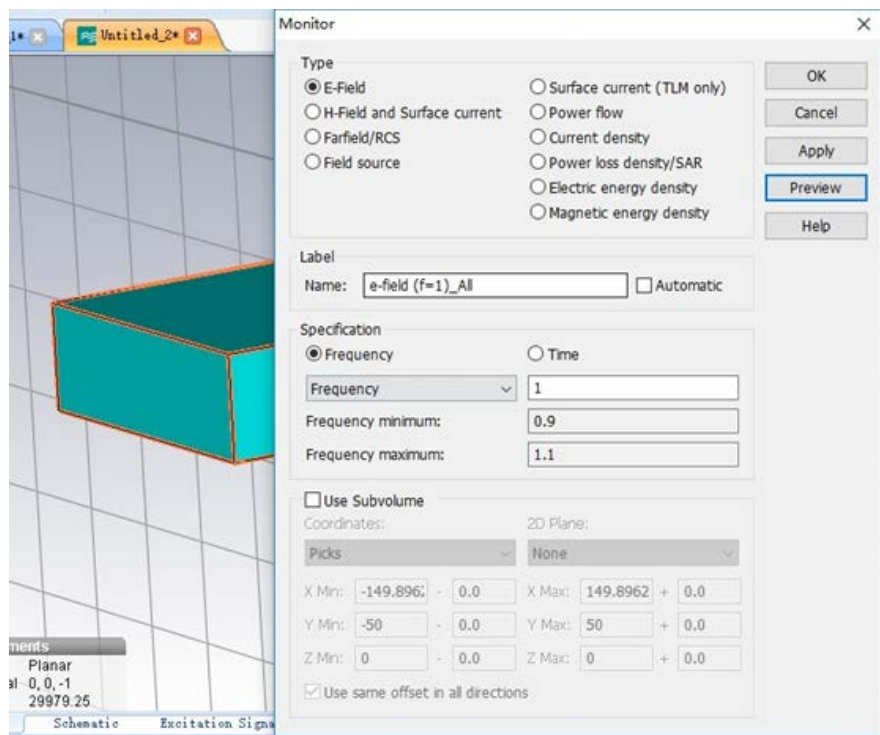
6) 点击 Simulation—Plane Wave 设置参数如图并 ok。



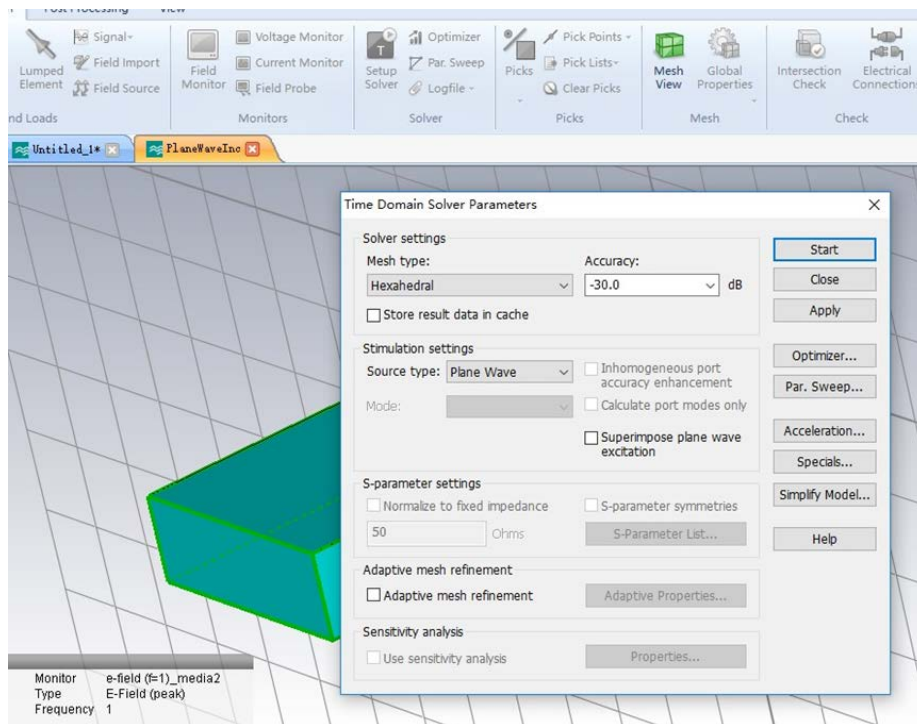
7) 点击 Simulation—Boundaries, 设置如下图。



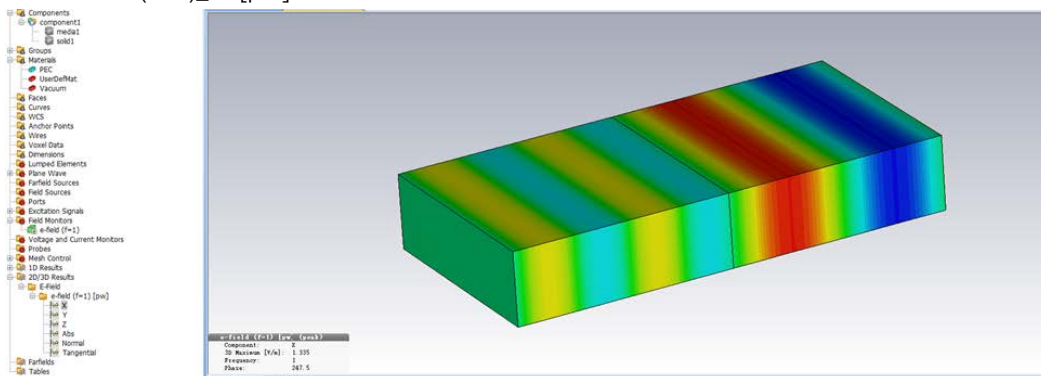
8) 点击 Simulation—Field Monitor, 设置如图并点击 OK。



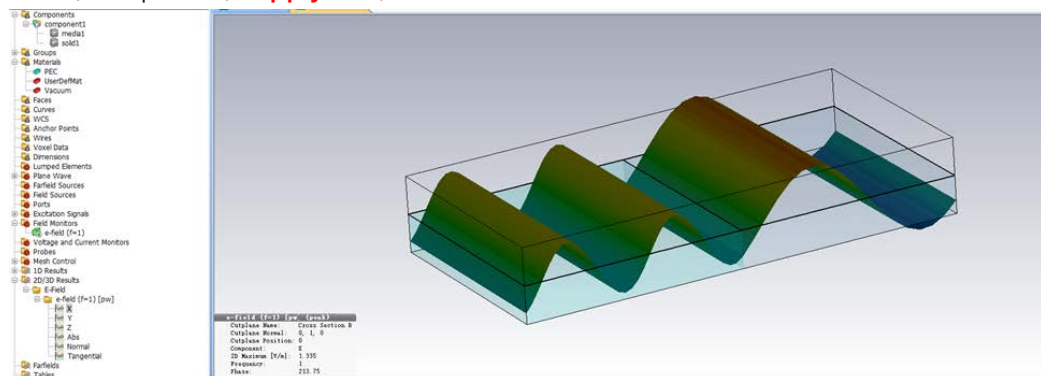
9) 点击 Simulation—Setup Solver，设置如图，点击 Start 开始运行



10) 运行时右下角 Process 中有进度条。运行结束后，选择左边栏 2D/3D Results—E-Field—e-field(f=1)_All[pw]—X

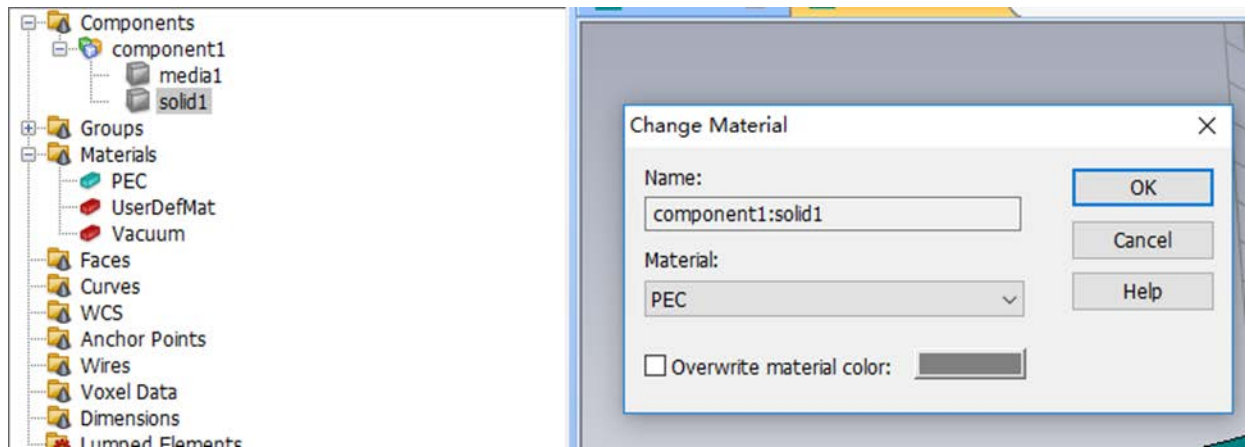


11) 点击 2D/3D Plot, 选择 3D Fields on 2D Plane, 然后 Properties 设置如图，展示更好看的 Carpet 图，Apply 后截图。（看 x 分量）

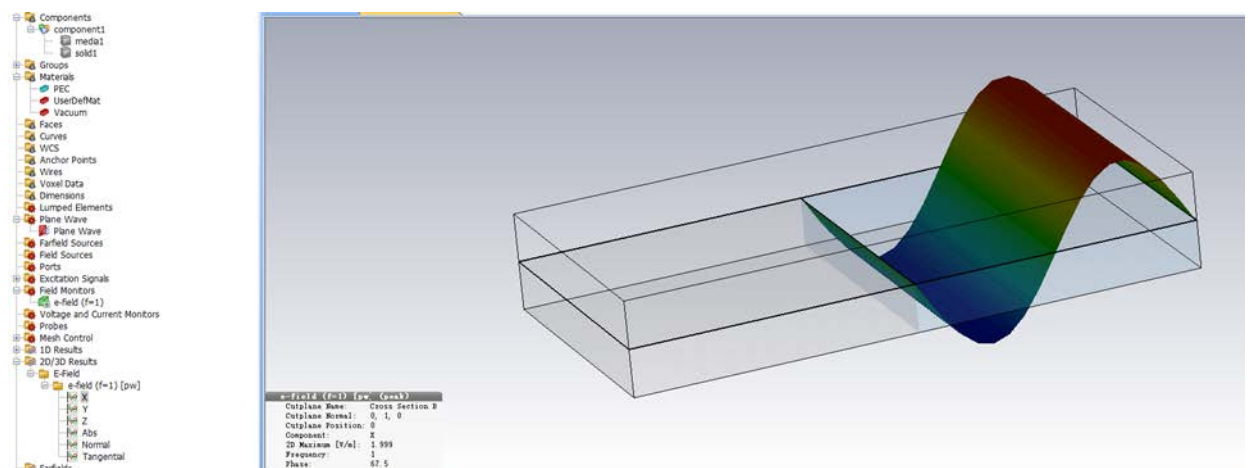


c) 从无损材料射到 PEC 平面

1) 右键 solid1, 选择 Change Material And Color 将 material 从 UserDefMat 变为 PEC, 如下图,



2) 类似(b)进行模拟并展示结果, **截图: (x 方向分量)**



Part 2 矩形波导仿真

a) 了解并搭建矩形波导仿真环境

矩形波导是最早用于传输微波信号的传输线类型之一，而且今天仍然有很多应用。用于从 1GHz 到超过 220GHz 波段的各种标准波导的大量元件，例如耦合器、检波器、隔离器、衰减器及槽线等。由于小型化和集成化趋势，大量微波电路现在都采用平面传输线，例如微带线和带状线，而不是用波导来制造。然而在很多应用中，例如高功率系统、毫米波系统以及一些精密检测应用中仍然需要波导。

中空矩形波导可以传播 TM 波和 TE 波，但不能传播 TEM 波。矩形波导也具有截止频率，低于截止频率就不能传播。

1) 新建project

Create New Project -> MW & RF & Optical -> Antennas -> Waveguide -> Time Domain -> Unit Set （对照下图，一般情况下无需更改）-> Frequency （设置为 5GHz 到 20GHz）-> Finish

Please select the units:

Dimensions:	mm
Frequency:	GHz
Time:	ns
Temperature:	Kelvin
Voltage:	V
Current:	A
Resistance:	Ohm
Conductance:	S
Inductance:	nH
Capacitance:	pF

在 parameter list 中设置实验所需参数，具体设置如图

Name	Expression	Value	Description	Type
xin	= 22.86	22.86		Undefined
yin	= 10.16	10.16		Undefined
xout	= 25.4	25.4		Undefined
yout	= 12.7	12.7		Undefined
<new parameter>				

2) 画波导

我们搭建的是 BJ-100 型矩形波导，其内部尺寸为 22.86*10.16mm，外部尺寸为 25.4mm*12.7mm，即下图的 x_{in} , y_{in} , x_{out} , y_{out} 对应前面的 22.86-10.16-25.4-12.7 (mm)。

Brick

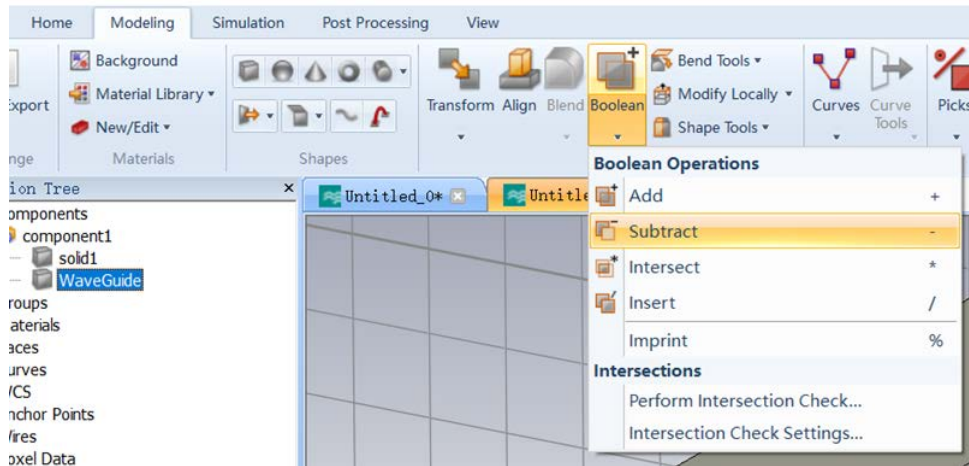
Name:	<input type="text" value="solid1"/>		OK
			Cancel
Xmin:	<input type="text" value="-xin/2"/>	Xmax:	<input type="text" value="xin/2"/>
Ymin:	<input type="text" value="-yin/2"/>	Ymax:	<input type="text" value="yin/2"/>
Zmin:	<input type="text" value="0"/>	Zmax:	<input type="text" value="50"/>
Component:	<input type="text" value="component1"/>		Preview
Material:	<input type="text" value="PEC"/>		Help

随后，在其外侧再画一个 Brick，要求 x 与 y （宽与高）尺寸略大。

Brick

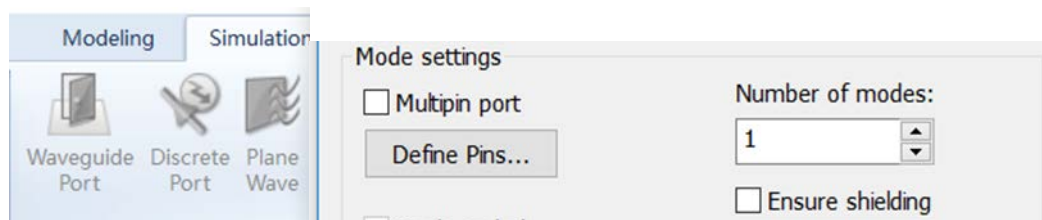
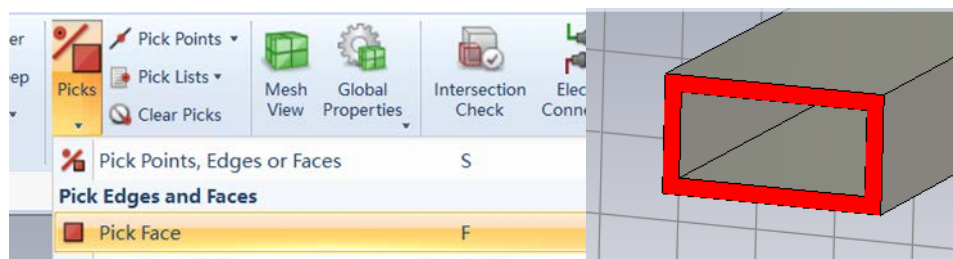
Name:	<input type="text" value="WaveGuide"/>		OK
			Cancel
Xmin:	<input type="text" value="-xout/2"/>	Xmax:	<input type="text" value="xout/2"/>
Ymin:	<input type="text" value="-yout/2"/>	Ymax:	<input type="text" value="yout/2"/>
Zmin:	<input type="text" value="0"/>	Zmax:	<input type="text" value="50"/>
Component:	<input type="text" value="component1"/>		Preview
Material:	<input type="text" value="PEC"/>		Help

在左侧 component 列表中，选择较大的 Brick（此处为 WaveGuide），点击 Modeling 菜单下的 Boolean -> Subtract，按照指示操作选择较小的 Brick（此处为 solid1），按下 Enter，即通过布尔操作，获得了一个真空矩形波导。



3) 添加Waveguide port

选择 Pick Face，双击波导开口处。再点击 Simulation -> Waveguide Port，设置 Number of modes 为 1，即模数为 1。对另一边的开口处作同样操作。



最终得到两个 Ports，为波导激励源。



4) 添加Field Monitor

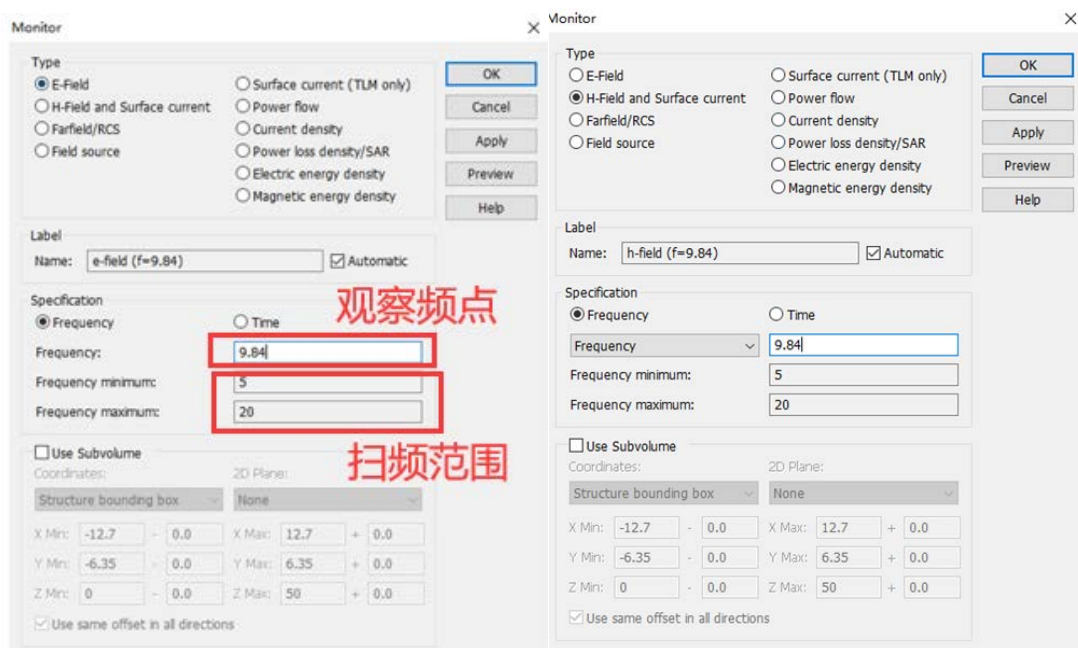
实验要求添加 E-field Monitor 与 H-field Monitor，并设置好对应侦测频率。此处记得进行频率范围设置，点击 Simulation 菜单下的 Frequency，确保侦测频率位于扫频范围中间。

这里 monitor 频率范围是 5GHz~20GHz（即 sweep5~20GHz 的范围）。

这里我们激励 TE₁₀ 模，对应的波导截止频率 f_c 为 6.56GHz（见下图），故我们观察的频率点可以设为 6.56GHz~13.123GHz（下一个模 TE₂₀ 对应的 f_c ）之间的任意频率，这里选择 9.84GHz。

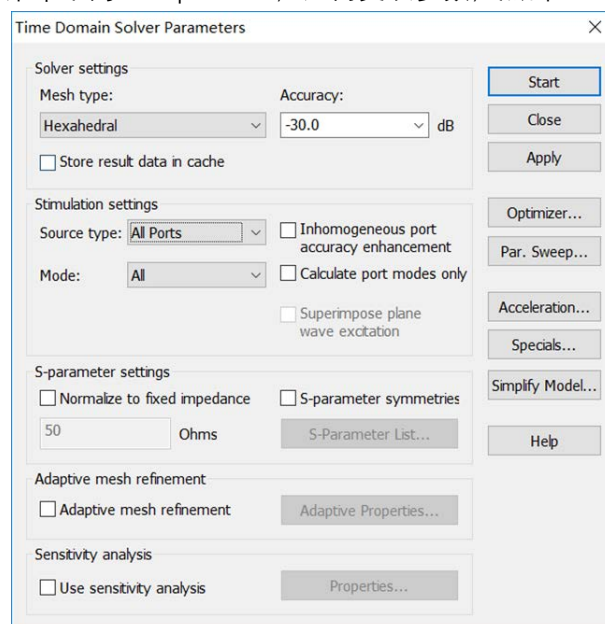
注意：不同模的 f_c 在课后作业部分需要自己计算，并写出计算过程！

Mode	中心介质(ϵ_r)	f_c (GHz)	λ_g (mm)	×
TE10	1	6.56	40.89	$1.5f_c = 9.84$ $2.5f_c = 16.404$
TE10	4	3.28	40.89	$1.5f_c = 4.921$
TE20	1	13.123	20.4	$1.5f_c = 19.685$
TE01	1	14.76		
TE11	1	16.15		
TE21	1	19.75		

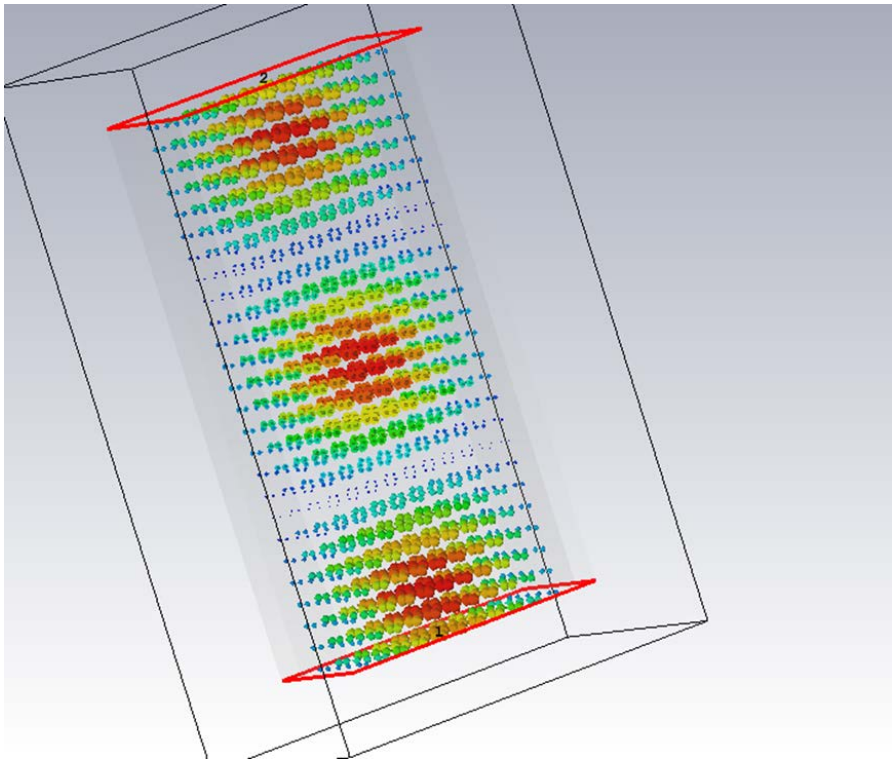


5) 运行仿真

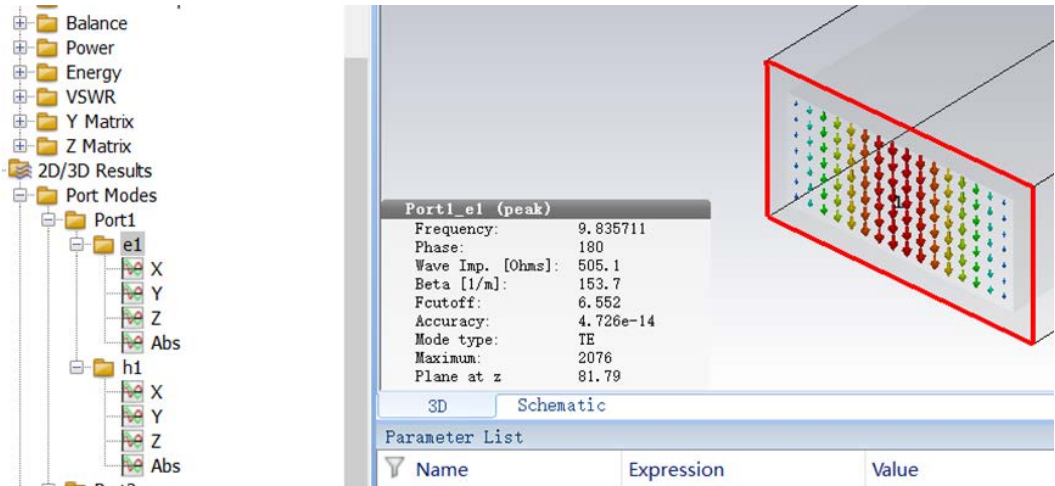
点击 Simulation 菜单下的 Setup Solver, 无需更改参数, 点击 Start 开始运算。



此处的 Source type – All Ports 代表所有激励源分别激励，Mode – All 为激励所有设置的模数（先前设置 1）。得到仿真结果如图：
(仅展示 E-field)



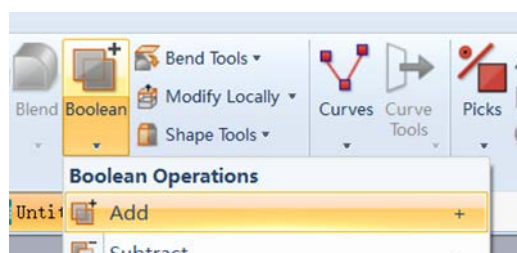
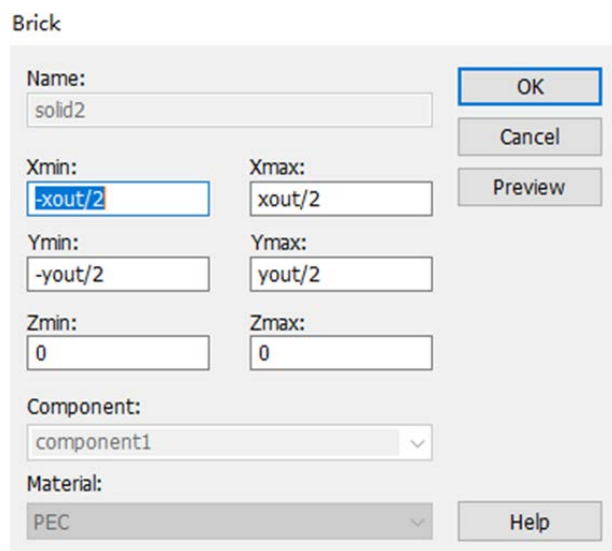
此处可点击 Port 进行研究，根据信息可得出这是 TE₁₀ 波，并可从中读出一些参数。



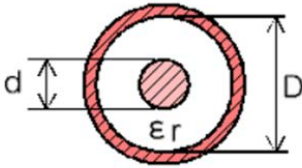
b) 了解并搭建同轴——矩形波导仿真环境（TE₁₀模）

同轴线传播的是 TEM 波，TEM 波的截止频率为 0。但同轴线同时支持 TE 与 TM 的传播，通常都是高次的，为避免不同传播常数的传播模叠加，也同时为避免高阶模的传播，同轴电缆的尺寸设置了上限，频率也需要通过最低阶波导型模式的截止频率给出限制。

- 1) 新建project, 并搭建矩形波导模型。注意：将其z方向长度改为100mm。
用PEC板封一侧口，然后用布尔相加操作（Boolean -> Add）合并。（PEC板参数如下图）



- 2) 得出同轴线尺寸，要求特征阻抗为50Ω， $D = 8\text{mm}$ ， $\epsilon_r = 1$ 。（下图结果可直接使用）



ϵ_r

d [mm]

D [mm]

>>> Z_o
 [ohm]

Z_o [ohm]

Input d >>> Synthesis D :
 Input D >>> Synthesis d :

C [pF/m]
 V_p [km/s]

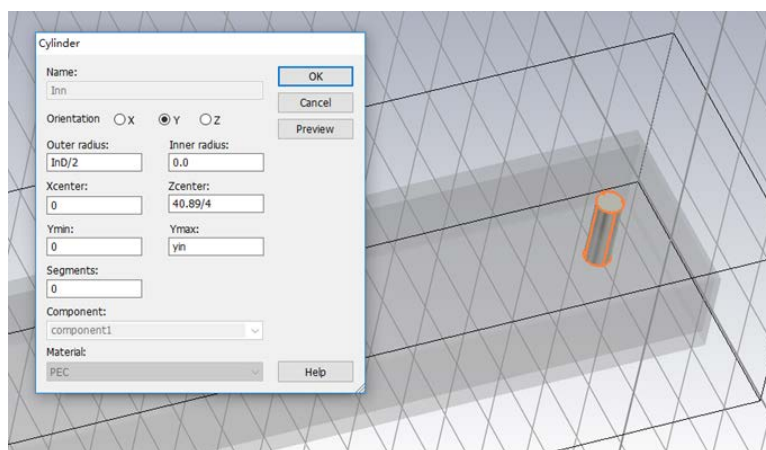
L [nH/m]
 td [ns/m]

xin	= 22.86	22.86	Undefined
yin	= 10.16	10.16	Undefined
xout	= 25.4	25.4	Undefined
yout	= 12.7	12.7	Undefined
outD	= 2.3	2.3	Undefined
InD	= 1	1	Undefined
Lg	= 40.89	40.89	Undefined

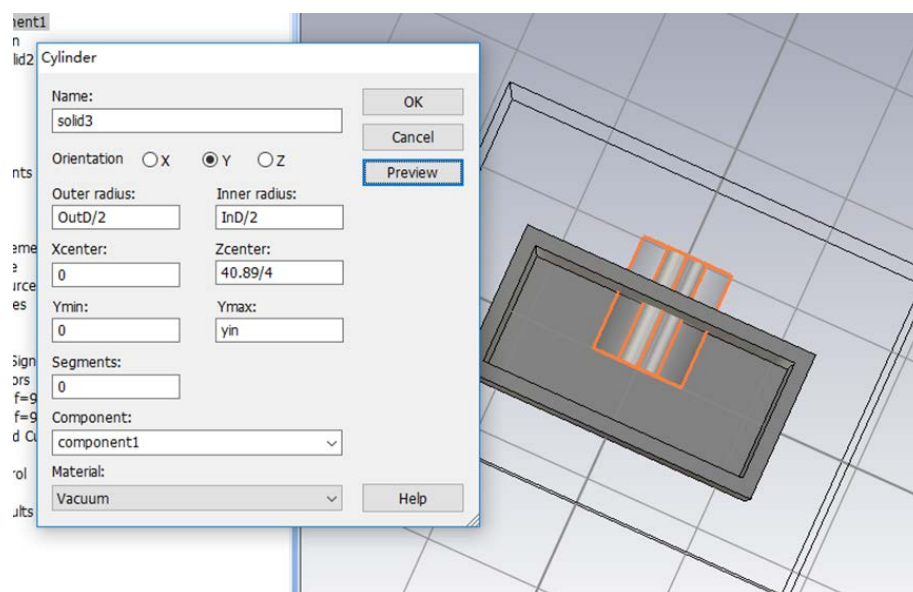
3) 搭建同轴线模型

这里导波波长 L_g 为40.89mm。注意： L_g 在课后作业部分需要自己计算，并写出计算过程！

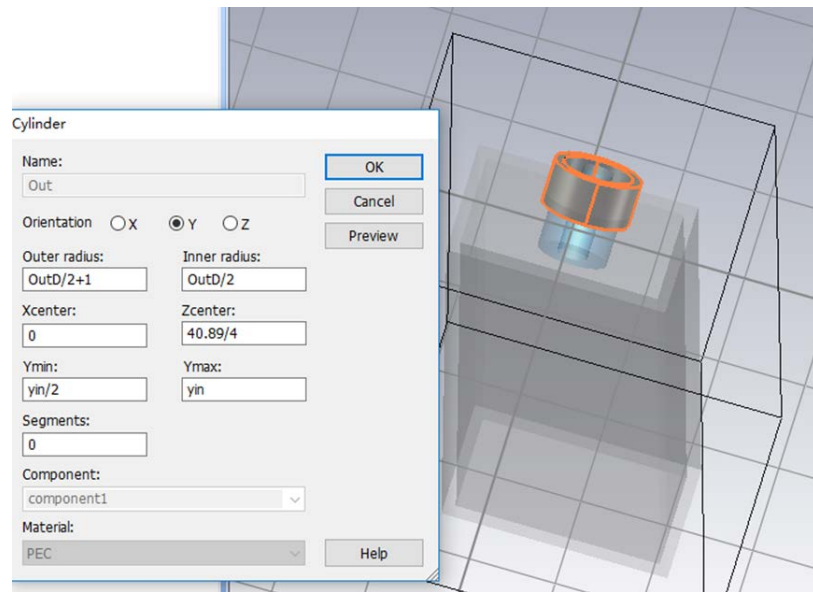
我们需要分三次来构建一个同轴线模型。首先绘制内部中心圆柱。同轴线画在 x 方向中心， $z=L_g/4$ （四分之一导波波长）处，并嵌入波导中，嵌入长度为该方向波导尺寸的一半，即 $y_{in}/2$ 。



然后绘制中间真空层，在因结构重合弹出的菜单中选择 Insert Highlighted Space，意为去除矩形波导材料/PEC 与真空层/Vaccum 重叠的部分。



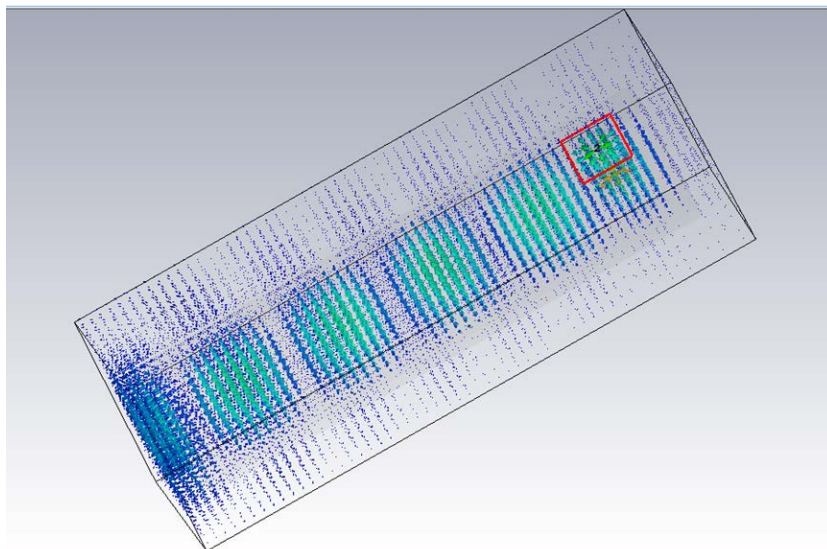
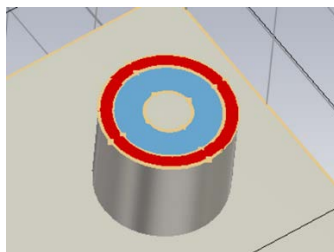
最后绘制外部圆环。



更方便的方法是用 Extrusions -> Extrude 功能进行绘制，此处为说明三层结构所以未使用，有兴趣可自行研究。

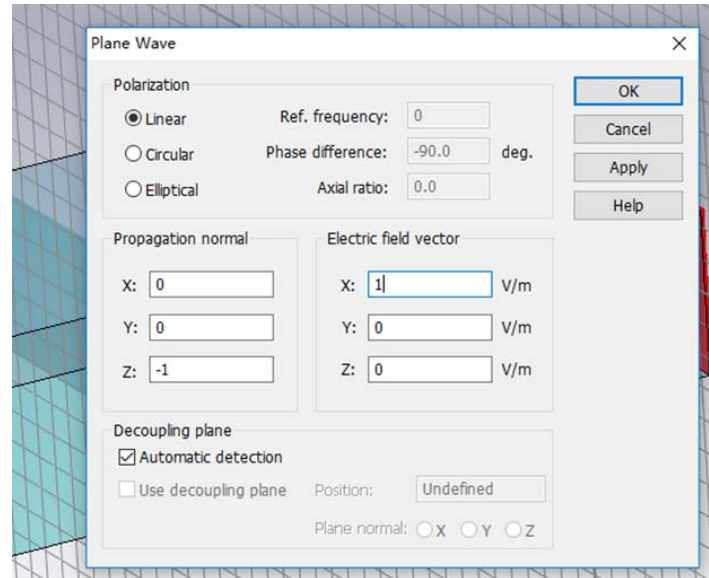
4) 添加Port与Field Monitor，进行仿真

如图选择面，添加 Waveguide Port，并依照之前的例子添加 E&H field Monitor，点击 Setup Solver 进行运算（TE₁₀ 模）。



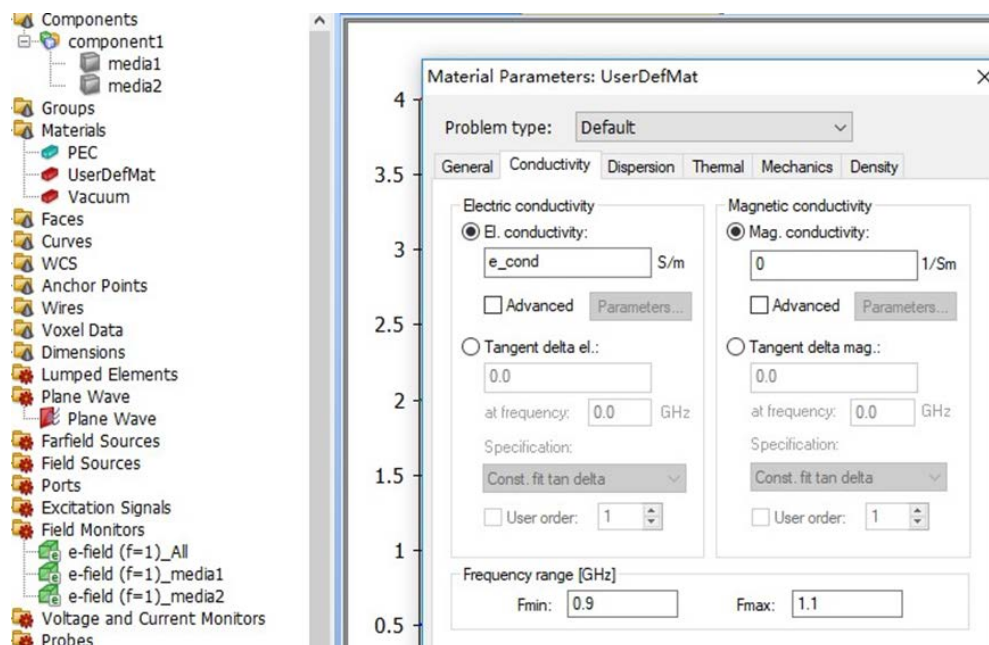
课后完成部分（相关结果写到实验报告中）

- a) 将part 1. (b) (6)中的平面波入射方向改为从介质($\epsilon_s=4$)射向真空中（如下图），其余操作同2.(b)，**再次仿真，记录图像结果。**

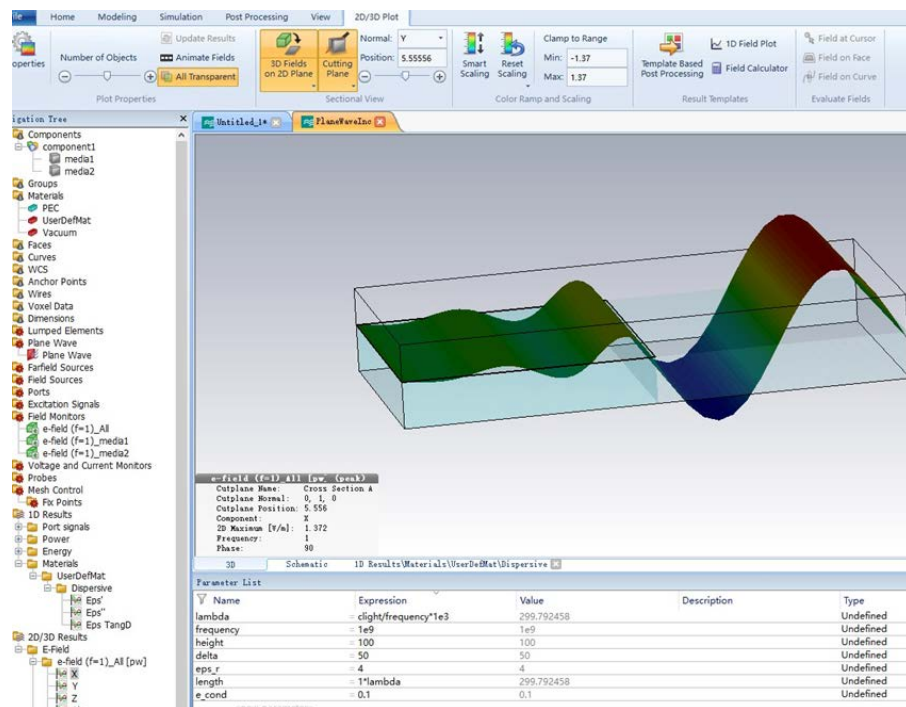


- b) 从无损材料入射到无损材料（类似part 1. (b)中步骤进行仿真）

1) 双击 UserDefMat（或右键 UserDefMat→Properties）打开材料设置界面，点击 Conductivity 如图设置，令材料电导率为 e_cond ，并设置数值为 0.1。

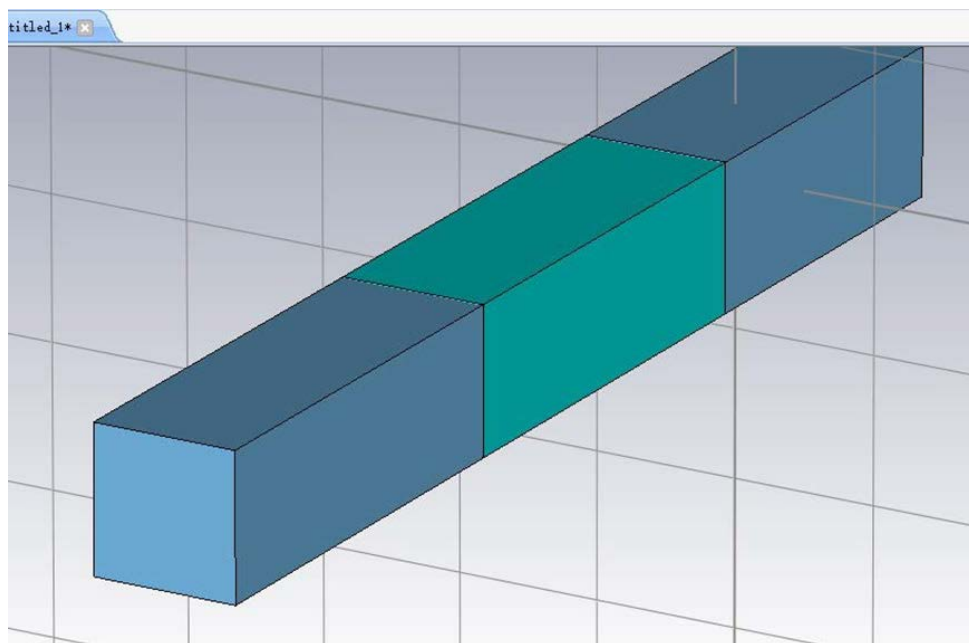


2) 其余步骤类似于 part1.(b), 最后点击 Setup Solver→Start, 要求截 Carpet 图展示波形, 并尝试计算理论数值。



c) 三个无损材料的入射

1) 参考 2.(b)中步骤, 建立第三种介质 (此处选择真空), 即整体结构为真空-介质-真空, 且要求中间的介质不可以为 PEC。



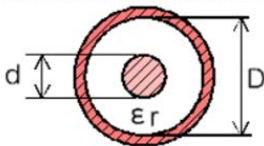
2) 参考2.(b)中步骤, 展示结果, 截图。

d) 同轴——矩形波导转换器再仿真（范例，不用写到报告中）（**TE20 模**）

能将一种传输波形转换成另一种传输波形的元件，称为波形转换器。从上例可知我们搭建了同轴——矩形波导转换器，将同轴线的 TEM 波转换到了矩形波导的 TE10 波。他的模型为，让同轴线的外导体与矩形波导的宽壁连在一起，内导体的延伸部分插入波导中，形成一个小辐射天线，在波导中激励出 TE10 波。

接下来我们需要设计并搭建同轴线——矩形波导转换器，要求在波导中激励出 **TE20 波**。

- 1) 新建或沿用先前的project（即part2. (a)部分），搭建矩形波导模型。同轴线尺寸如下，此处用较小尺寸。此处我们使用两根同轴线，加两个激励。



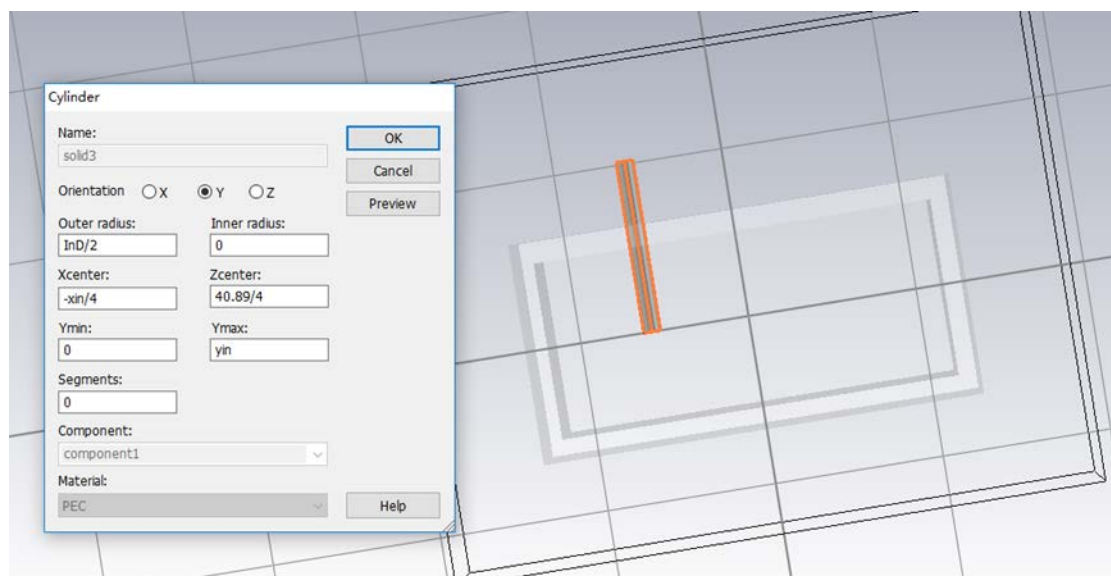
er	1	
d	1	[mm]
D	2.300975890569014	[mm]

Analyze >>> Zo [ohm]

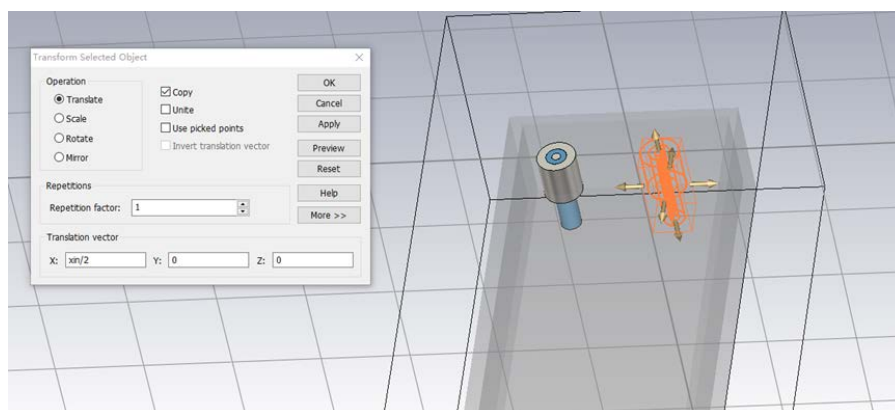
Zo 50 [ohm] Input d >>> Synthesis D : Synthesis(D)
 Input D >>> Synthesis d : Synthesis(d)

C	66.6672000112583	[pF/m]	L	166.66666663852112	[nH/m]
Vp	300000	[km/s]	td	3.33	[ns/m]

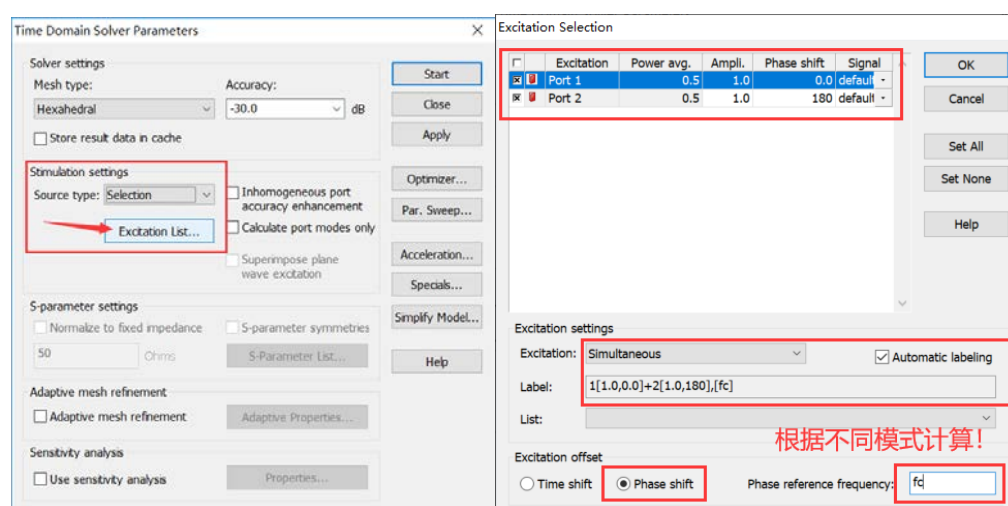
参照 part2. (b)部分的方法画出一根同轴线，再用复制的方法画出另一根。注意此时同轴线的位置，应处在 x 轴四等分点上，z 方向在 $z=\lambda_g/4$ 处，并并嵌入波导中，嵌入长度为该方向波导尺寸的一半，即 $y_{in}/2$ 。



画完一根后，按住 Ctrl，同时选中同轴线的三个 Components，点击 Modeling 菜单下的 Transform，勾选 Copy，移动出另一根同轴线。在因结构重合弹出的菜单中选择 Insert Highlighted Space，意为去除矩形波导材料/PEC 与真空层/Vacuum 重叠的部分。

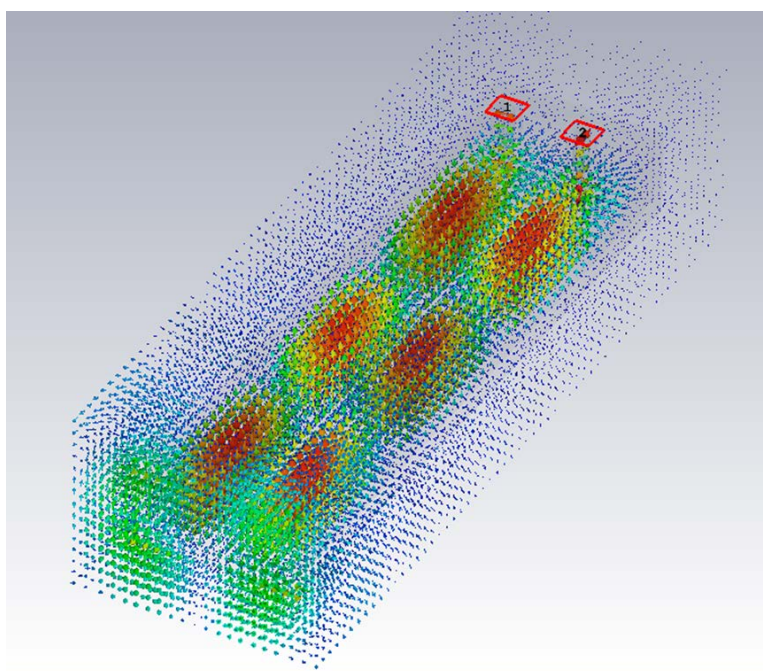


用与上例相同的方法在两根同轴线上添加激励，并将 Mode Number 设置为 1。更改相应 monitor 的观察频点（TE20 模），随后点击 Setup Solver，进行如下设置，再点击 Start 进行运算。



运算时间可能较长，需耐心等待。但如果时间过长，请及时检查操作是否有误。

参考结果，E-field（不用写到报告中）



e) Part 2 相关习题（要写到报告中）

【——参照 Part 2. (a)——】

- 1) 建立一个X波段矩形波导模型，要求传播方向为z，长边为x，短边为y。（BJ-100）将波导的四壁设置为较薄的PEC。计算导波波长 λ_g 与TE₁₀模的截止频率 f_c ，并用两种频率 $1.5*f_c$ 、 $2.5*f_c$ 进行模拟。波导z方向长度设置为 $1.5*f_c$ 频率下的2倍导波波长 $2*\lambda_g$ 。在波导两端放置激励源，添加Field-Monitor，**展示电场与磁场在xy、xz、yz横截面上的图案，以及壁上（侧壁与顶/底面）的电流密度图案。**
- 2) 使用Part 2. (a)的矩形波导模型，要求在波导模型中填充相对介电常数为4（ $\epsilon_{r,rel}=4$ ）的无损材料，计算TE₁₀模的截止频率 f_c ，在 $1.5*f_c$ 频率下进行模拟。展示**电场与磁场在xy、xz、yz横截面上的图案。**
- 3) 使用Part 2. (a)的矩形波导模型，要求计算TE₂₀模的截止频率 f_c ，在 $1.5*f_c$ 频率下进行模拟。展示**电场与磁场在xy、xz、yz横截面上的图案。**

【——参照 Part2. (b)——】

- 4) 建立同轴线馈电的矩形波导模型，使用Part 2. (a)的矩形波导模型与截止频率 f_c ，封掉 $z=0$ 的波导口，添加特征阻抗为 $Z_0=50\Omega$ ， $D=8\text{mm}$ 的同轴线馈电，同轴线在y方向上嵌入波导尺寸的一半，x方向位于波导中心，z方向位于 $z=\lambda_g/4$ ，尝试解释为何要如此设置同轴线位置。展示 **$z=3/8*\lambda_g$ ， $1/2*\lambda_g$ ， λ_g ， $2*\lambda_g$ 平面，与xy横截面上的电场图案**，尝试分析并解释。

【——参照课后完成部分(d)——】

- 5) 建立同轴线馈电的矩形波导模型，使用Part 2. (a)的矩形波导模型，封掉 $z=0$ 的波导口，添加特征阻抗为 $Z_0=50\Omega$ ， $d=1\text{mm}$ 的同轴线馈电，要求使矩形波导中生成TE₂₀模，但同时不产生TE₁₀模。同轴线在 y 方向上嵌入波导尺寸的一半， x 方向位于波导中心， z 方向位于 $z=\lambda_g/4$ 。展示电场在 xy 横截面上的图案，尝试分析并解释。

e)中所有计算需给出计算过程。

图案注意写明分量，为 $x/y/z$ 还是 Abs 。展示能说明模场特征的图案即可。

思考题目（相关结果写到实验报告中）

- a) 根据part 1. (b)(c)和课后完成部分(a)(b)(c)中的结果填表，分析并尝试计算反射系数、透射系数，对比理论值。要求给出计算公式。

		介质1		介质2		介质3		理论值	
		ϵ_{r1}	μ_{r1}	ϵ_{r2}	μ_{r2}	ϵ_{r3}	μ_{r3}	反射系数	透射系数
无损到无损	1					/	/		
	2					/	/		
无损到有损	3			/	/	/	/		
无损到PEC	4			/	/	/	/		
三种介质	5								

- b) 分析并简单解释part 1. (b)(c)和课后完成部分(a)(b)(c)中各波形图现象。

总结：需要写在报告里的内容

- 课后完成部分(a)(b)(c)(e)
- 思考题目(a)(b)