

波动光学模块

简介

波动光学模块简介

© 1998–2016 COMSOL 版权所有

受 cn.comsol.com/patents 中列出的美国专利和美国专利 7,519,518、7,596,474、7,623,991、8,457,932、8,954,302、9,098,106、9,146,652 和 9,323,503 的保护。专利申请中。

本文档和本文所述的程序根据 COMSOL 软件许可协议 (cn.comsol.com/comsol-license-agreement) 提供，且仅能按照许可协议的条款进行使用和复制。

COMSOL、COMSOL 徽标、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、LiveLink 和 COMSOL Server 为 COMSOL AB 公司的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联，亦不为其正式认可、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 cn.comsol.com/trademarks。

版本：COMSOL 5.2a

联系信息

请访问“联系 COMSOL”页面 cn.comsol.com/contact，以提交一般查询、联系技术支持或搜索我们的联系地址及电话号码。您还可以访问全球销售办事处页面 cn.comsol.com/contact/offices，以获取地址和联系信息。

如需联系技术支持，可以访问 COMSOL Access 页面并填写在线申请表，位于：cn.comsol.com/support/case。其他有用链接还包括：

- 技术支持中心：cn.comsol.com/support
- 产品下载：cn.comsol.com/support/download
- 产品更新：cn.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客：cn.comsol.com/blogs
- 用户论坛：cn.comsol.com/community
- 活动：cn.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心：cn.comsol.com/video
- 技术支持知识库：cn.comsol.com/support/knowledgebase

文档编号：CM023502

目录

简介	5
波动光学模块的应用.....	6
波动光学模块物理场接口.....	13
根据空间维度和研究类型排列的物理场接口.....	17
教学示例：定向耦合器.....	18
简介	18
模型定义.....	19
结果与讨论	21
参考文献.....	24

简介

波动光学模块被工程师和科学家们用于理解、预测和设计电磁波传输和光学应用中的谐振效应。此类仿真衍生出很多功能强大且有效的产品和工程方法。通过仿真，用户可以快速准确地预测一个新型设计中的电磁场分布、传输、反射和功率损耗。与传统制造原型机的实验方法相比，仿真有助于减少成本，评估和预测出实验中无法直接测量的物理特征。它还能用于考察可能会破坏实际原型机或比较危险的操作条件。

本模块包含二维和三维空间中的电磁场和电磁波。所有建模公式均基于求解 Maxwell 方程组，并结合用于各种介质中传输的材料定律。通过预定义的物理场接口，统称为**波动光学接口**，用户可以建立并求解电磁场模型。**波动光学接口**包含频域、时域、特征频率和模式分析中电磁场和电磁波的建模。

在此框架下，**波动光学接口**表示为 Maxwell 方程组的微分形式，以及对应的初始和边界条件，并对其进行求解。方程使用有限元方法和数值稳定边界单元离散来求解，并结合对结果方程组稀疏矩阵进行预条件和求解的最新算法。这些结果以电磁场、S 参数、功率流和损耗的预定义绘图显示，也能以用户自由定义的物理量表达式的绘图来显示结果，或以表格的形式显示从仿真中获取的派生值。

仿真工作流程简便直接，分为以下步骤：定义几何、选择材料、选择适当的**波动光学接口**、定义边界和初始条件、定义有限元网格、选择求解器及可视化结果。所有这些步骤均在 COMSOL Desktop 中进行。求解器选择步骤通常使用默认设置自动完成，软件根据特定的**波动光学接口**进行调整。

波动光学模块的 App 库通过教程和基准示例描述了基于不同公式的接口及其不同特征，其中包含光栅和超材料、非线性光学、光散射、波导和耦合器，以及确认和验证**波动光学接口**准确性的基准模型。

本简介旨在使用户快速开始建模工作。提供**波动光学模块**的典型应用示例，包含物理场接口的简短描述列表，以及介绍建模工作流程的教学示例。

波动光学模块的应用

波动光学接口用于对光学应用中的电磁场和电磁波进行建模。通常情况下，光学应用的典型波长是纳米至微米范围，对应于数百 THz 量级的频率。光学应用的特性也是结构常常大于波长。

波动光学仿真常用于确定不同类型波导结构的传输和耦合属性。[图 1](#) 显示了一个定向耦合器中的电场分布。一束波进入左边的波导，经过 2mm 传输后，耦合至右边的波导。波导由离子轰击增强 GaAs 组成，周围是 GaAs 包层。

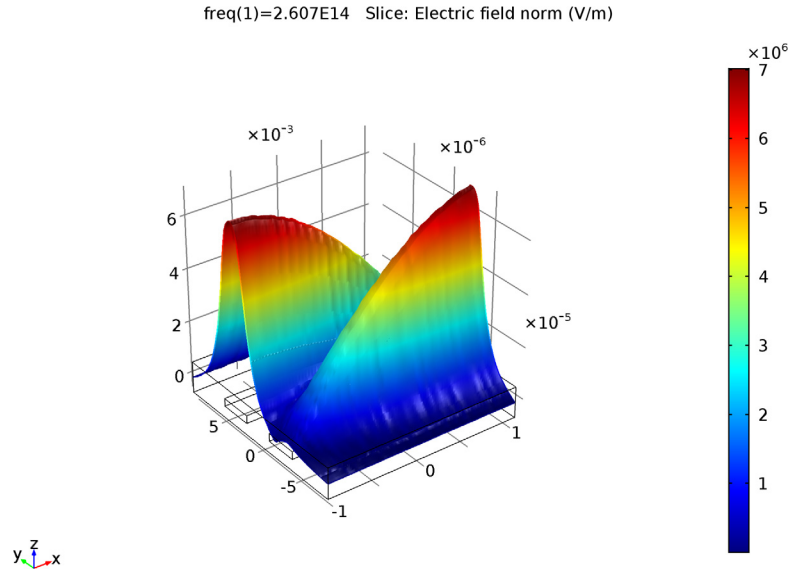


图 1: 定向耦合器中的电场分布。注意传输长度是 2 mm，截面积是 12 mm 乘 18 mm。参见波动光学模块 App 库中的 *Directional Coupler* 案例。

图 2 显示了非线性晶体中瞬态传输的案例。下图显示了当波传播到晶体中央时，位于晶体中的总电场，即入射的基波和产生的二次谐波之和。

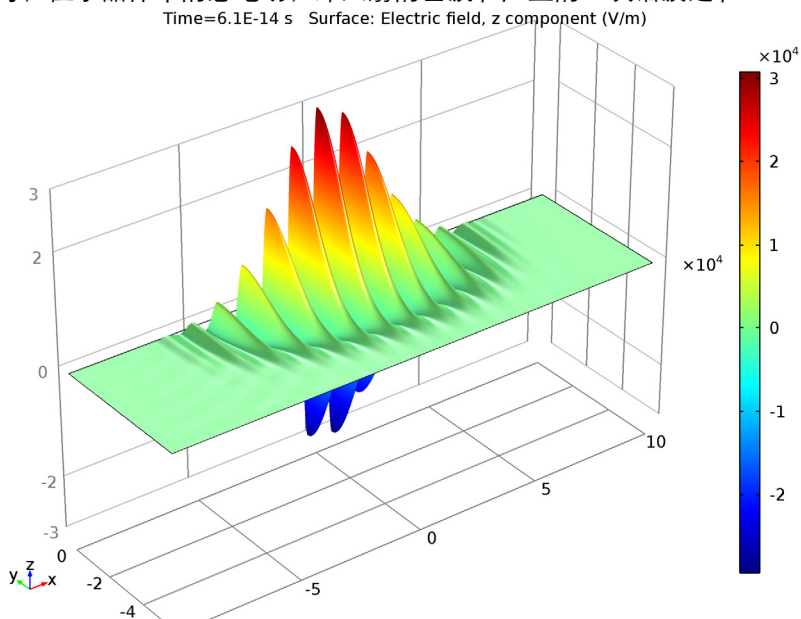


图 2: 在非线性晶体中传输 61 fs 后，电场的 z 分量。参见波动光学模块 App 库中的 *Second Harmonic Generation* 案例。

瞬态仿真在对涉及短波脉冲的非线性光学过程建模时非常有用。另一个非线性光学传输的案例是自聚焦效应，如图 3 所示。在此，高斯光束和随强度变化的折射率在材料中形成了一个自聚焦透镜，抵消了衍射的扩散效应。

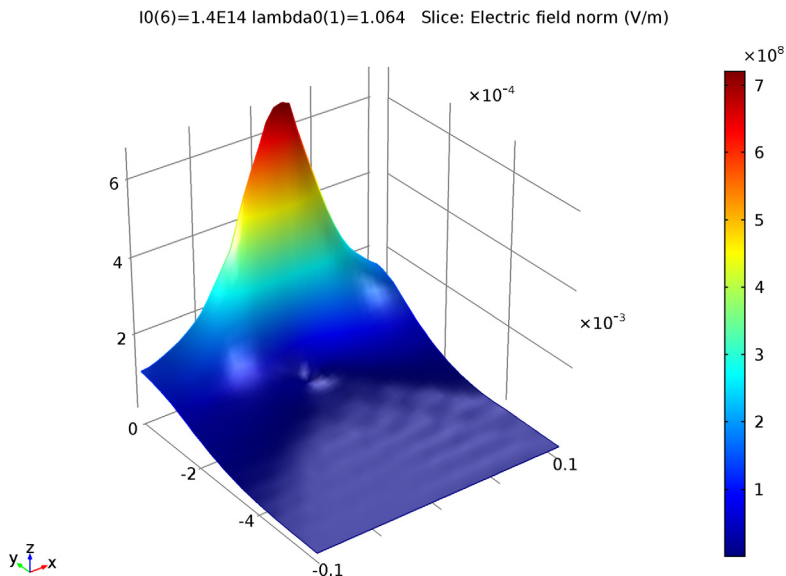


图 3: 在随强度变化折射率的介质中传输的高斯光束的电场分布。参见波动光学模块 App 库中的 Self-Focusing 案例。

在图 4 和图 5 中，波动光学模块 App 库中的一个模型显示了入射平面波被一个纳米级金球散射。模型使用散射场公式建立，入射平面波输入为背景场。散射波由完美匹配层 (PML) 吸收。图 4 显示了金球中的体阻抗损耗。

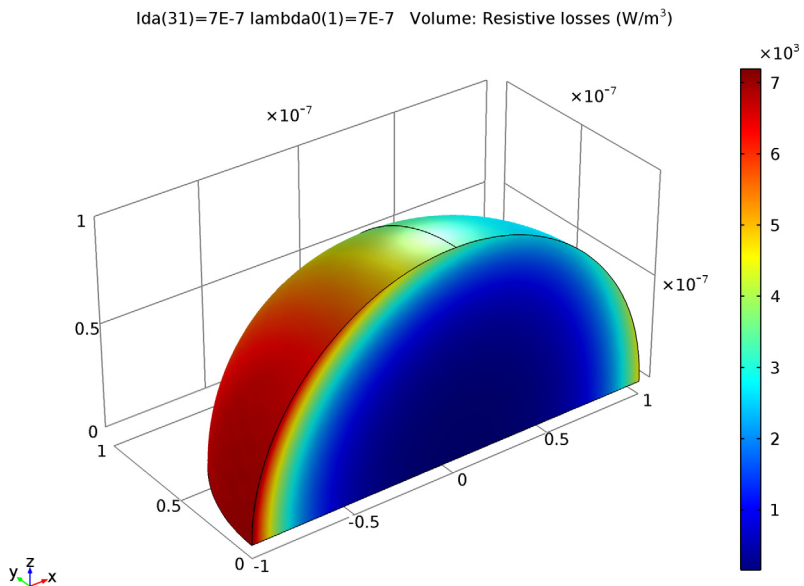


图 4: 入射平面波激励时一个纳米金球中的体阻抗损耗。参见波动光学模块 App 库中的 *Scattering Nanosphere* 案例。

模型使用**远场域**来计算散射波的远场模式，如图 5 所示。

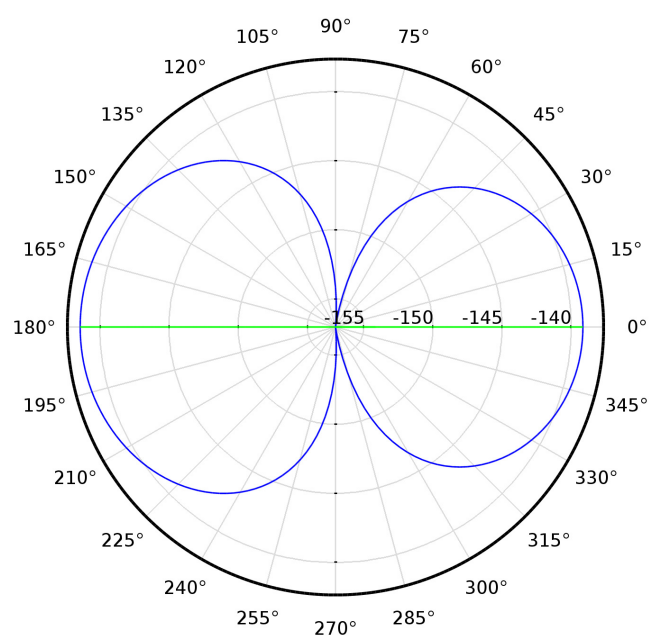


图 5: 波长为 700nm 时，E 平面（蓝）和 H 平面（绿）中的远场辐射图。

波动光学模块还提供用于二维建模的综合特征集，包括有源驱动的波传播和模式分析。图 6 显示了一个阶跃折射率型光纤的模式分析。

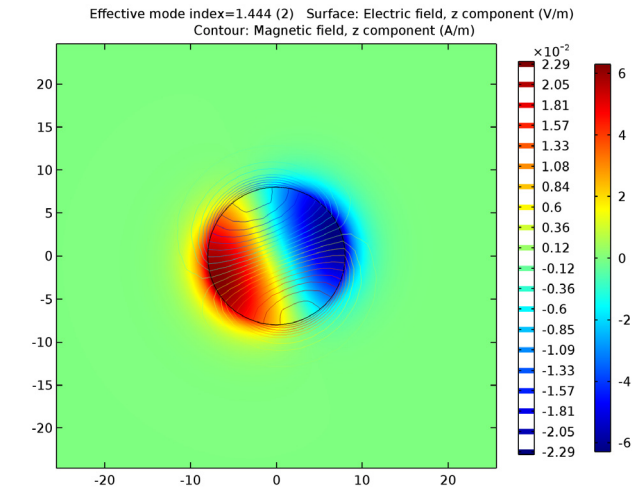


图 6: 表面图对纤芯中电场的纵向分量进行了可视化。参见波动光学模块 App 库中的 Step Index Fiber Bend 案例。

在二维和三维中，周期性结构的分析的应用都非常广泛。图 7 是一个平面波入射在带有介质基底的线光栅上的案例。

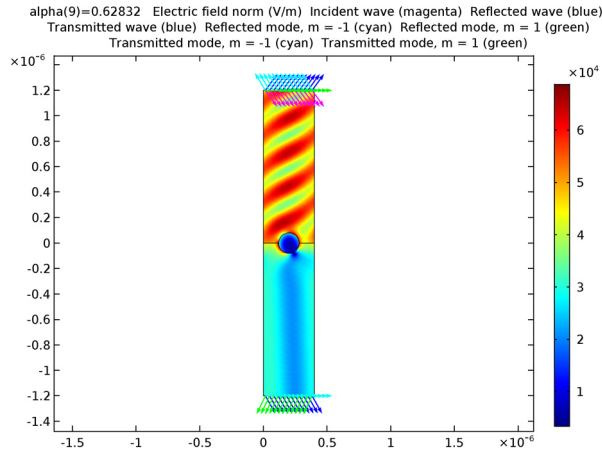


图 7: $\pi/5$ 弧度的 TE 入射电场模。参见波动光学模块 App 库 Plasmonic Wire Grating 案例。

波动光学模块提供大量的工具用于计算并导出结果，例如，计算远场和散射矩阵（S 参数），其中 S 参数可导出为 Touchstone 文件格式。

波动光学模块物理场接口

波动光学接口基于 Maxwell 方程组，结合材料定律。在本模块中，这些物理定律通过**波动光学**接口转换为各类偏微分方程组，并具有相应的初始和边界条件。

波动光学接口定义了一系列特征。每个特征都表示底层基于 Maxwell 方程的公式中的一项或一个条件，可在模型的某个几何实体上定义，例如域、边界、边（适用于三维模型）或点。

图 8 使用来自**波动光学模块** App 库的**表面等离子体线光栅** App 来显示**模型开发器**窗口和选定的**波方程，电 1**特征节点的**设置**窗口。**波方程，电 1**节点对模型中所选几何域的 Helmholtz 波动方程添加了表示电磁波的项。

此外，**波方程，电 1**节点还可以链接至材料特征节点，以获取类似相对介电常数 / 折射率的物理属性，本例中采用了用户定义的电介质折射率。介电材料节点定义的属性可以是所建模物理量的函数，例如温度。第一种材料，空气，在本模型作为用户定义的材料；第三种材料，金线（标记为 Au (Rakic)），来自**光学材料数据库**。由于这三种材料都定义了折射率，在本 App 中只需要一个波动方程。

仿真域由边界条件特征节点确定。**波动光学模块**中物理场的默认边界条件特征是**完美电导体**特征。对于**图 8**中的案例，**完美电导体 1**特征节点被两个**端口**特征节点和一个**周期性条件**特征节点覆盖。**端口**特征用于激励和吸收波，**周期性**

条件与具有周期性条件的边界相关（例如，连续性、反周期性和一般 Floquet 相位关系）。

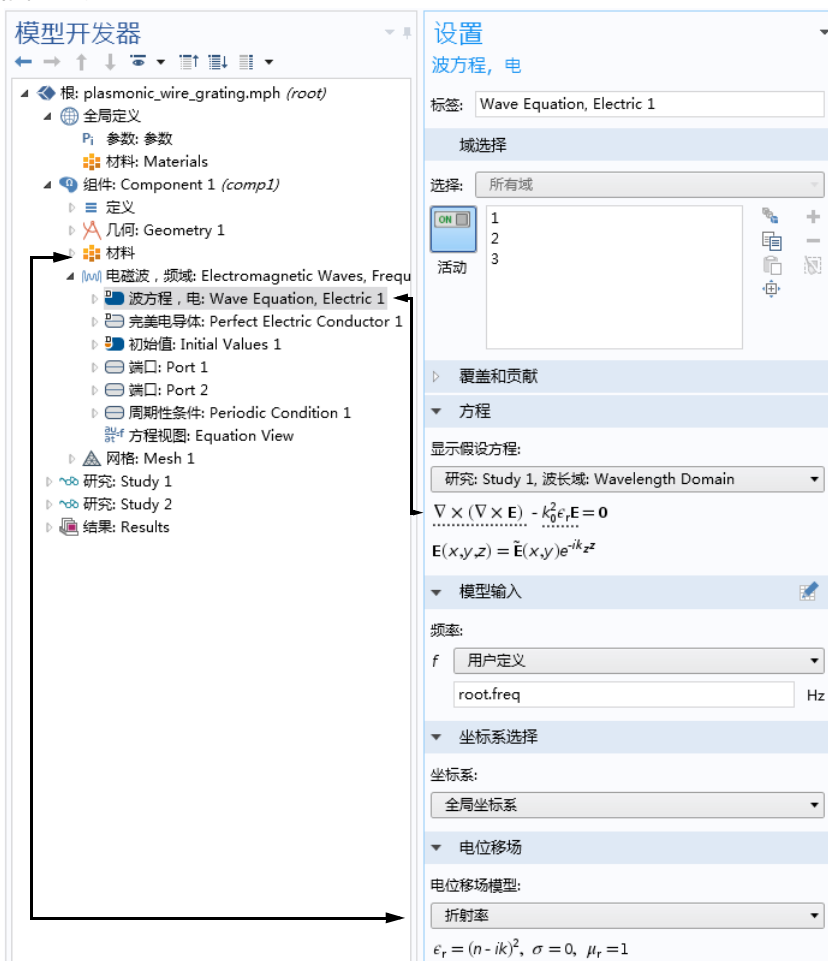


图 8: 模型开发者窗口 (左) 和波方程, 电的设置窗口 (右)。方程部分显示了模型方程和由波方程, 电 1 节点添加到模型方程的项。添加的项有虚线下划线, 并通过文本解释了介电常数和折射率的值之间的链接。

图 9 显示了模型向导中所示的本模块的波动光学接口。

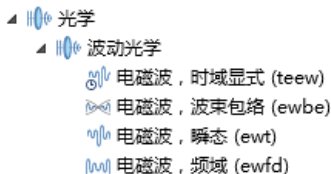


图 9: 如模型向导中所示的波动光学模块物理场接口。

本模块包含分别用于频域建模和时域建模的**波动光学接口** ()。也包含**激光加热接口**，在传热下可用。请参见“[根据空间维度和研究类型排列的物理场接口](#)”。

如果拥有**半导体模块**许可证，则可以获取对电磁波与半导体的相互作用进行建模的**半导体光子学**、**电子束包络**和**半导体光子学及频域接口**。

下面对这些预设的**波动光学接口**进行简要概述。

电磁波，频域

电磁波，频域接口 () 用于求解电场的频域波动方程，源可以是点偶极子、线电流或者边界或域上的入射场等形式，主要用于对电磁波在不同介质和结构中的传播进行建模。将公式变形，通过求解一个特征值问题来找到结构的特征频率，或在指定的频率下，通过求解特征值问题来找出在波导和传输线中的传播模式。本接口模拟的一些典型应用是波导、光栅、以及来自小颗粒的散射。

电磁波，波束包络

电磁波，波束包络接口 () 用于求解一个或两个电场包络的频域波动方程。电场表现为求解电场包络和一个快变的预设相函数的结果。由于电场包络比电场有更慢的空间变化，就能使用更粗糙的网格。因此，**电磁波，波束包络接口** 适合光学大结构（远大于波长的结构）的仿真。源可以是边界上的入射场、表面电流、边界上的电场或磁场的形式。本接口能用于固定频率下的传输问题和在谐振结构中找出特征频率。本接口模拟的一些典型应用是波导结构、类似定向耦合器、非线性光学现象以及激光束传输。

电磁波，时域显式

电磁波，时域显式接口 () 用于求解两个电场和磁场的一阶偏微分方程的方程组（Faraday 定律和 Maxwell-Ampère 定律），使用时域显式间断 Galerkin 方

法。源可以是体电流或磁流，也可以是边界上的表面电流或场的形式。主要用于模拟电磁波在线性介质中的传播，典型应用包括电磁脉冲的瞬态传播。

电磁波，瞬态

电磁波，瞬态接口 () 用于求解电场的时域波动方程。源可以是点偶极子、线电流，也可以是边界或域上的入射场的形式。主要用于模拟当需要时域解时电磁波在不同介质和结构中的传播，例如非正弦波形或非线性介质。典型应用包括电磁脉冲的传播和非线性光学介质中谐波的产生。

激光加热

激光加热接口 () 用于模拟系统和器件的电磁加热，其中电场的幅值在波长尺度变化缓慢。这是一个多物理场接口，相当于**电磁波，波束包络**接口和**固体传热**接口的耦合接口。多物理场耦合从电磁波添加电磁损耗作为热源，且电磁材料属性能够随温度变化。建模方法基于相对于热时间尺度而言电磁周期时间小得多的假设。

电磁波，波束包络接口的频域建模和**固体传热**接口稳态建模的结合称为频域 - 稳态。与之类似，在二维和三维中也支持频域 - 瞬态建模。

根据空间维度和研究类型排列的物理场接口

下表列出了 COMSOL Multiphysics 基本许可证提供的物理场接口和特定于此模块的物理场接口。

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的预设研究类型
 传热				
 电磁热				
激光加热 ¹		—	三维； 二维； 二维轴对称	频域 - 稳态； 频域 - 瞬态
 光学				
 波动光学				
电磁波，波束包络		ewbe	三维； 二维； 二维轴对称	边界模式分析； 特征频率； 频域； 波长域； 频域模式
电磁波，频域		ewfd	三维； 二维； 二维轴对称	边界模式分析； 特征频率； 频域； 波长域； 频域模式； 模式分析（仅限二维或二维轴对称）
电磁波，时域显式		teew	三维； 二维； 二维轴对称	瞬态
电磁波，瞬态		ewt	三维； 二维； 二维轴对称	特征频率； 瞬态； 瞬态模式
¹ 此物理场接口是预设的多物理场耦合接口，其中自动添加了所有相关物理场接口和耦合特征节点。				

教学示例：定向耦合器

简介

定向耦合器用于从一个波导耦合光波至另一个波导。通过控制两个波导中的折射率，例如采用加热或电流注入等方式，可以控制波导之间的耦合量。

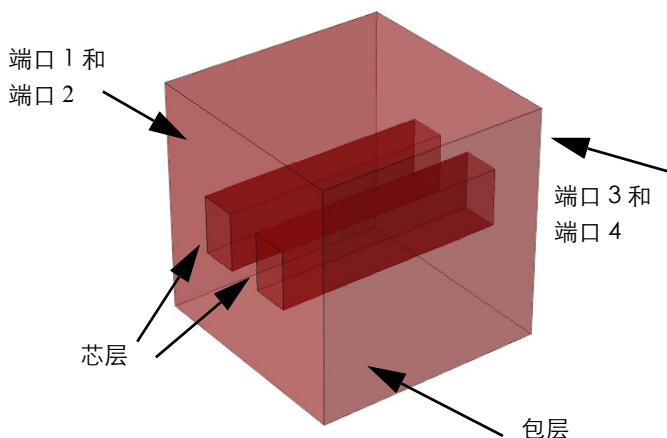


图 10: 波导结构的示意图。结构由两个波导芯层和周围的包层组成，其中端口 1 和 2 用于激励波导，端口 3 和 4 吸收波。注意，为便于观察，波导结构并不是按照真实比例绘制。波导长度为 2mm 左右，截面是边长为 $3\mu\text{m}$ 的正方形，波导间隔为 $3\mu\text{m}$ 。

通过介质波导传播的光，其中大部分功率集中在波导的中央芯层。在波导芯层外的包层中，电场随远离芯层的距离成指数衰减。然而，如果在第一个波导附近放置另一个波导芯层（参见图 11），第二个波导将干扰第一个波导的模式（反之亦然）。因此，并不是在相同有效折射率中存在两个模式，而是在第一个波导中有一个局部模式，第二个波导中有第二个，且这些模式及其各自的有效折射率分离，得到一个对称的超模（参见图 11 和图 13），其有效折射率略大于无干扰波导模式的有效折射率。此外，还有另一个非对称的超模（图 12 和图 14），其有效折射率略小于无干扰波导模式的有效折射率。

由于超模是波动方程的解，如果激励其中之一，它将无干扰地通过波导进行传播。然而，如果同时激励传播常数不同的对称和非对称模式，在这两个波之间会产生节拍。当波沿波导结构传播时，将看到功率在两个波导间来回波动。因此，可以调整波导结构的长度来得到从一个波导至另一个波导的耦合。通过调整两个超模场间的相位差，可以决定最初将激励哪个波导。

模型定义

定向耦合器，如图 10 所示，由两个波导芯层嵌入到一个包层材料所组成。包层材料是 GaAs，波导芯层是离子注入的 GaAs。参见 Ref. 1。

芯层截面是正方形，边长为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。两个波导间隔为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。波导结构的长度是 2 mm 。因此，考虑到与长度相比狭窄的截面，使用几何纵横比存在差异的视图更加便于观察。

对于这类问题，传播长度远大于波长，**电磁波，波束包络**接口特别适合，因为剖分网格时无需考虑基于波长的尺度来解析波，而只需考虑解析两个波之间的节拍。

本模型的创建思路是排除和第一个模式同步发生的快速相位变化。在数学上，总电场写成两个模式电场之和，

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}_1 \exp(-j\beta_1 x) + \mathbf{E}_2 \exp(-j\beta_2 x) \\ &= [\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \exp(-j(\beta_2 - \beta_1)x)] \exp(-j\beta_1 x)\end{aligned}$$

方括号中的表达式是将求解的部分。有一个拍长 L ，定义为

$$(\beta_2 - \beta_1)L = 2\pi$$

或

$$L = \frac{2\pi}{\beta_2 - \beta_1}.$$

在仿真中，拍长必须很好地得到解析。由于波导长度是拍长的一半，且波导长度离散为 20 个部分，因此在模型中可以很好地解析拍长。

本模型在输入和出口边界各使用两个数值端口（图 10），分别定义了波导结构最低阶的对称和反对称模式。

结果与讨论

图 11 至图 14 显示了初始边界模式分析的结果，前两个模式（有最大有效折射率的模式）都是对称的。图 11 显示了第一个模式，沿 z 方向有横向极化分量。第二个模式，如图 13 所示，沿 y 方向有横向极化分量。

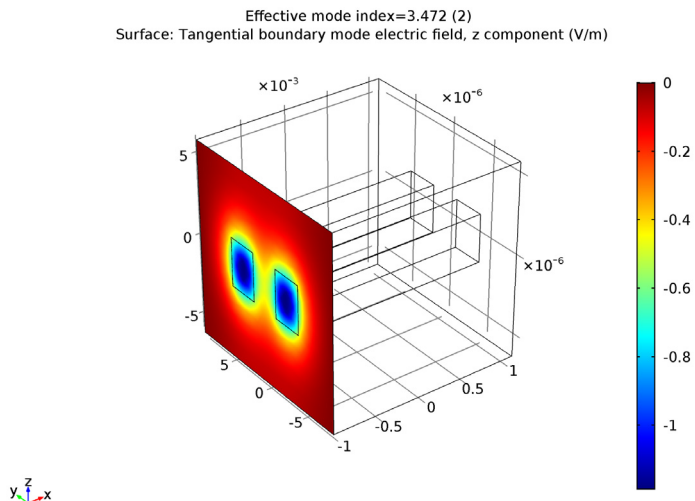


图 11: z 极化的对称模式。注意，结果也可能会在芯层处显示电场为正的峰值。

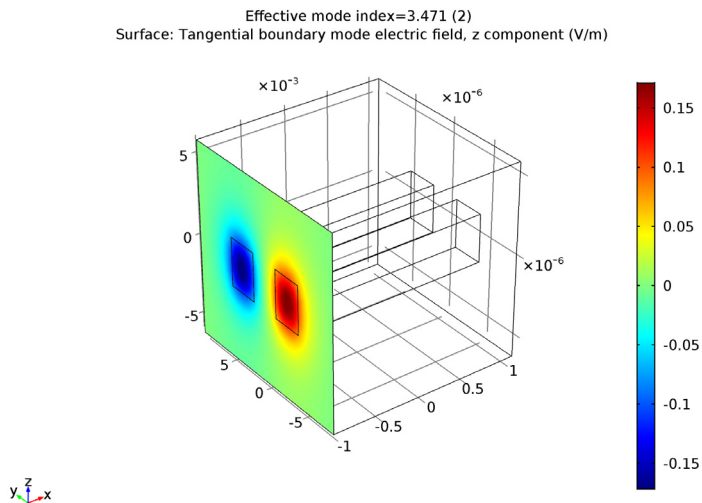


图 12: z 极化的反对称模式。

图 12 和图 14 显示了反对称模式，其有效折射率略小于对称模式。图 12 显示了 z 极化的模式，图 14 显示了 y 极化的模式。

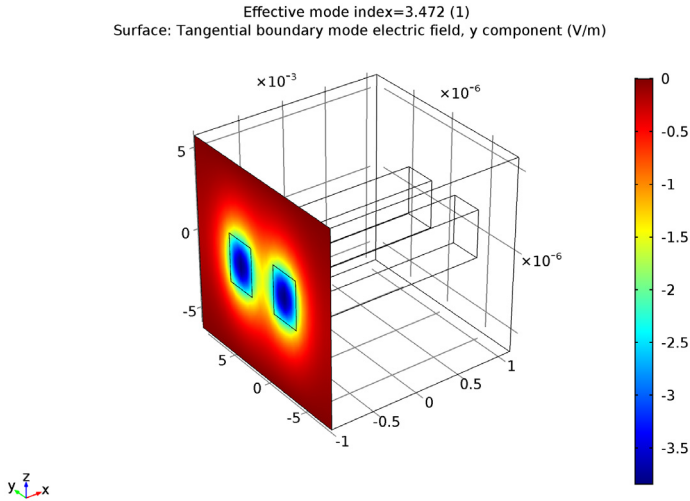


图 13: y 极化的对称模式。注意，结果也可能在芯层处显示电场为正的峰值。

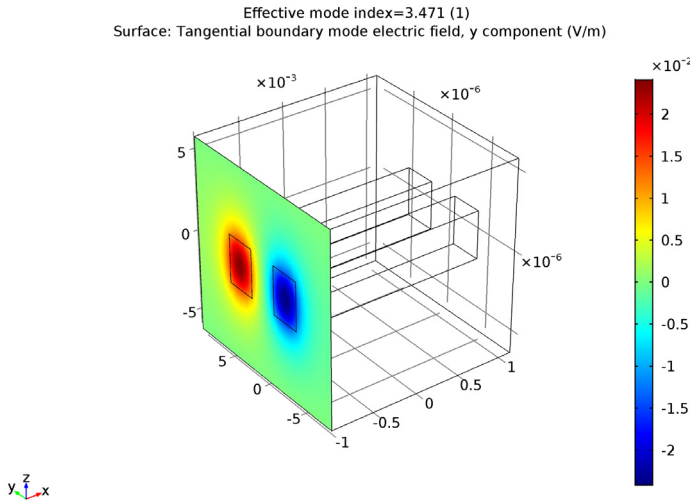


图 14: y 极化的反对称模式。

图 15 显示了电场如何在接收波导中增大，并在激励波导中减少。如果波导变长，波将在波导之间来回变换位置。

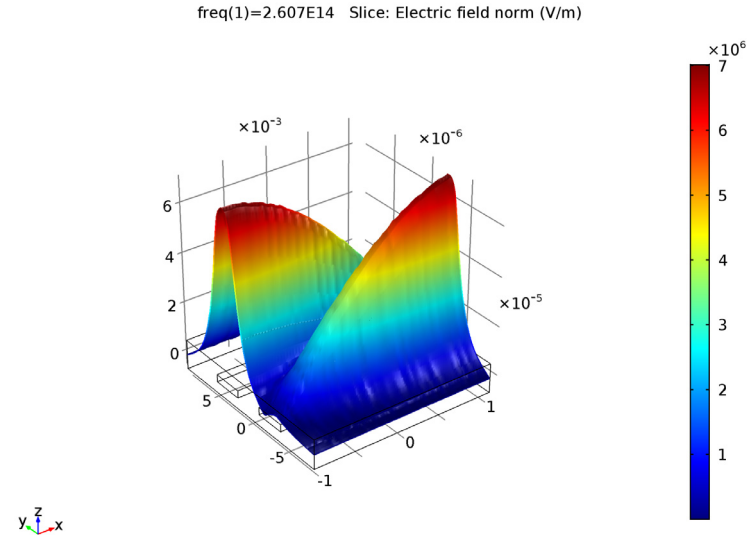


图 15: 对称和反对称模式的激励，波从输入波导耦合至输出波导。注意，如果模场符号与图 11 至图 14 所示的不同，可能是在另一个波导芯层产生激励。

图 16 显示了激励端口的场之间有 π 相位差时的结果。在这种情况下，两个模式的叠加导致另一个波导的激励（与图 15 中的情况相比）。

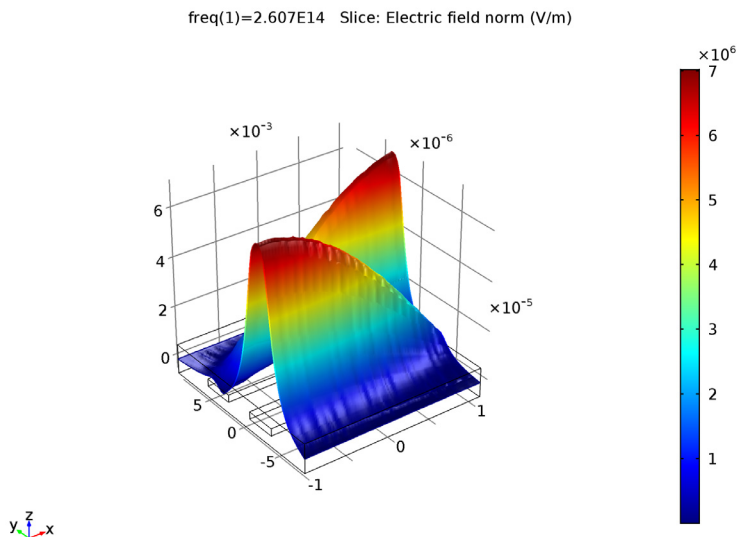


图 16: 激励条件与图 15 相同，除了两个端口间有一个 π 弧度的相位差。注意，如果模场符号与图 11 至图 14 所示的不同，可能是在另一个波导芯层产生激励。

参考文献

1. S. Somekh, E. Garmire, A. Yariv, H.L. Garvin, and R.G. Hunsperger, “Channel Optical Waveguides and Directional Couplers in GaAs-Imbedded and Ridged,” *Applied Optics*, vol. 13, no. 2, pp. 327–30, 1974.

模型向导

这些分步操作说明可指导您在三维下对定向耦合器进行精确的设计和建模。首先，定义简单几何与材料。然后，确定最低阶的模式。接下来使用这些模式（对称与反对称模式相结合）激励波导结构。最后，显示如何改变一个模式的符号来激励另一个波导。

注：这些操作说明基于 Windows 用户界面，但同样适用于 Linux 和 Mac，只是略有差异。

- 1 双击桌面上的 COMSOL 图标，启动软件。当软件打开后，选择使用**模型向导**来创建新的 COMSOL 模型或使用**空模型**来手动创建。在本教程中，单击**模型向导**按钮。

如果 COMSOL 已打开，可以从**文件**菜单选择**新建** ，然后单击**模型向导**  来启动它。

模型向导可指导您完成建立模型的最初几个步骤。下一个窗口可供您选择建模空间的维度。

- 2 在**选择空间维度**窗口单击**三维** 。
- 3 在**选择物理场**树下的**光学 > 波动光学**中，选择**电磁波，波束包络 (ewbe)** 。
- 4 单击**添加**，然后单击**研究** 。
- 5 在**研究**树下，选择**预设研究 > 边界模式分析** 。
- 6 单击**完成** 。

全局定义 - 参数

首先，定义一组参数来创建几何，并定义材料参数。

- 1 在**主屏幕**工具栏上选择**参数** P_i 。

如果 COMSOL Multiphysics 不是全屏模式或不是大窗口，可以在**主屏幕**工具栏上单击**定义** ，然后选择**参数** P_i 。

注：在 Linux 和 Mac 下，**主屏幕**工具栏是指 Desktop 顶部附近的一组特定控件。

2 在**参数**的设置窗口中，在**参数表**中输入以下设置：

设置

参数

▼ 参数

名称	表达式	值	描述
wl	1.15[um]	1.15E-6 m	Wavelength
f0	c_const/wl	2.6069E14 1/s	Frequency
a	3[um]	3E-6 m	Side of waveguide cross-section
d	3[um]	3E-6 m	Distance between the waveguides
len	2.1[mm]	0.0021 m	Waveguide length
width	6*a	1.8E-5 m	Width of calculation domain
height	4*a	1.2E-5 m	Height of calculation domain
ncl	3.47	3.47	Refractive index of GaAs
dn	0.005	0.005	Refractive index increase in waveguide...
nco	ncl+dn	3.475	Refractive index in waveguide core

↑ ↓ ↶ ↷ ↵ ↶ ↷

几何 1

在**全局定义 - 参数**部分，定义几何的参数。使用参数化几何可以轻松地试验不同尺寸的波导结构。

要构建几何，从定义仿真域开始，然后添加两个嵌入的波导。

长方体 1

1 在**几何工具栏**上单击**长方体** 。

2 前往**长方体**的**设置**窗口，在**尺寸与形状**栏：

- 在**宽度**文本框中输入 len。
- 在**深度**文本框中输入 width。
- 在**高度**文本框中输入 height。

- 3 在位置下，从基准列表选择中心。



设置

长方体

构建选定 构建所有对象

标签: Block 1

对象类型

类型: 实体

尺寸与形状

宽度: len m

深度: width m

高度: height m

位置

基准: 中心

x: 0 m

长方体 2

现在添加第一个嵌入的波导。

- 1 在几何工具栏上单击长方体 .
- 2 前往长方体的设置窗口，在尺寸与形状栏：
 - 在宽度文本框中输入 len。
 - 在深度文本框中输入 a。
 - 在高度文本框中输入 a。
- 3 在位置下，从基准列表选择中心。

4 在 **y** 文本框中输入 $-d$ 。

设置

长方体

构建选定 构建所有对象

标签: Block 2

对象类型

类型: 实体

尺寸与形状

宽度: len m

深度: a m

高度: a m

位置

基准: 中心

x: 0 m

y: $-d$ m

z: 0 m

长方体 3

添加第二个波导，方法是复制并粘贴第一个波导并修改其位置。

1 右键单击长方体 2 ，并选择生成副本 。

2 前往长方体的设置窗口。在位置栏的 y 文本框中输入 d。

设置

长方体

构建选定 构建所有对象

标签: Block 3

对象类型

类型: 实体

尺寸与形状

宽度: len m

深度: a m

高度: a m

位置

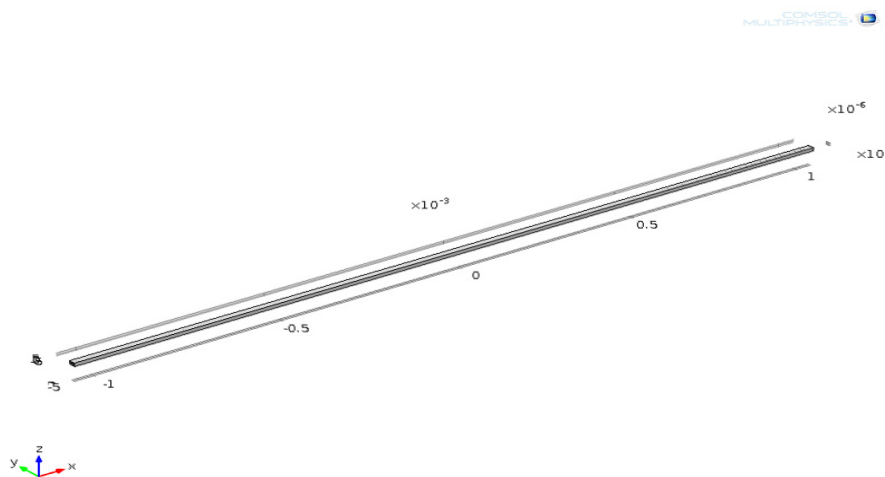
基准: 中心

x: 0 m

y: d m

z: 0 m

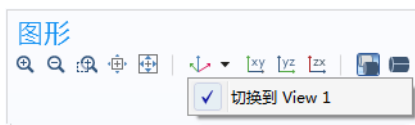
3 单击构建所有对象按钮 。



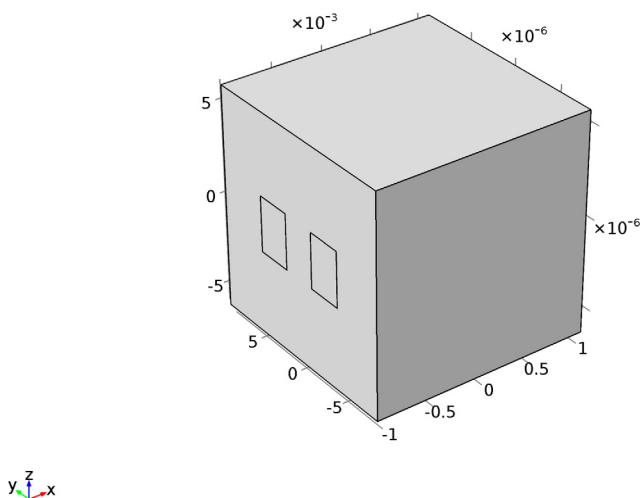
定义

由于几何非常长且窄，在视图中采用非维持纵横比的模式更易于观察。

- 1 在**模型开发器**窗口中打开**组件 1 > 定义 > 视图 1** 节点 ，然后单击**相机模式** 。
- 2 前往**相机模式**的**设置**窗口，找到**相机模式**栏，从**查看比例**列表中选择**自动**。
- 3 在**图形**工具栏上，单击**视图**按钮  旁的向下小箭头，并从下拉菜单中选择**切换到视图 1** 按钮。



然后单击**缩放到窗口大小**按钮  来生成下图。



材料

现在，添加波导包层和芯层的材料。首先，添加波导包层材料，第一个材料默认指定给所有域。在第二步中，将定义波导芯层材料。

对于此波导结构，包层材料使用 GaAs，芯层材料使用离子注入的 GaAs。

材料 1

- 1 从材料工具栏选择空材料。
- 2 前往材料的设置窗口，在标签文本框中键入 GaAs cladding。



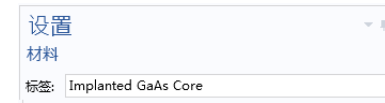
- 3 在材料属性目录栏下的表中输入以下设置：

材料属性目录				
属性	名称	值	单位	属性组
☒ 折射率实部	n	ncl	1	折射率
☐ 折射率虚部	ki	0	1	折射率

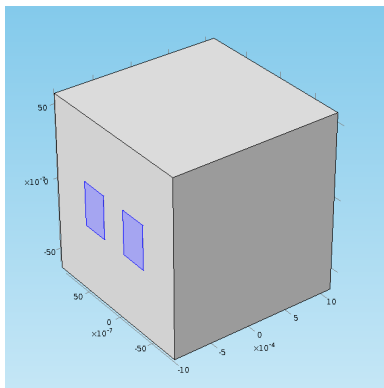
折射率虚部的 Stop 符号会在您离开设置面板后消失。

材料 2

- 1 从材料工具栏选择空材料。
- 2 前往材料的设置窗口，在标签文本框中键入 Implanted GaAs core。



3 仅选择波导芯层，域 2 和 3。



4 在**材料属性目录**栏下的表中输入以下设置：

材料属性目录					
»	属性	名称	值	单位	属性组
☒	折射率实部	n	nco	1	折射率
☐	折射率虚部	ki	0	1	折射率

电磁波，波束包络

对许多仿真问题，在不同的材料之间有一些边界，会产生沿反方向传播的反射波。因此，**电磁波，波束包络**接口的默认设置是执行双向仿真。

然而，对定向耦合器问题，不希望有任何反射波。因此本例中最好选择单向。

1 从**主屏幕**工具栏选择**电磁波，波束包络**。

2 在**设置窗口**的**波矢**栏下，从**方向数**列表中选择**单向**。

3 在 k_1 表的 x 文本框中输入 `ewbe.beta_1`，如图所示。

波矢		
方向数:		
单向		
相明细表类型:		
波矢		
波矢，一次波:		
k_1	ewbe.beta_1	x
	0	y
	0	z
		rad/m

此操作可以将波矢设为最低阶波导模式的波矢，基于此波矢设置，电场的相位因子将完美匹配最低阶模式，但与同时激励的更高阶模式略不匹配，如“[模型定义](#)”部分所述。`ewbe.beta_1` 显示橙色，表明该变量尚未定义，我们会在添加第一个端口时定义。

端口 1

要在输入边界激励波，并在输出边界吸收波，可在每个边界上使用两个数值端口。前两个端口用于激励波导。

每个数值端口都有一个与之相关的边界模式分析求解步骤。边界模式分析求解通过特征值求解找出与端口相关的模场和传播常数。**边界模式分析**步骤将先在[研究 1](#)中为**端口 1**定义。然后在[研究 1](#)定义剩余端口的边界模式分析（相同名称，但链接至不同部分）。

1 在物理场工具栏上单击**边界** ，并选择**端口** .

2 选择边界 1、5 和 10，如右图所示。

3 前往端口的设置窗口，从端口属性栏的端口类型列表中选择数值。

4 从端口波激励列表中选择开。
现在，复制并粘贴第一个端口。

端口 2

1 右键单击端口 1 ，并选择生成副本 。

现在，在波导结构的另一端创建吸收端口。

端口 3

1 在物理场工具栏上单击边界 ，并选择端口 。

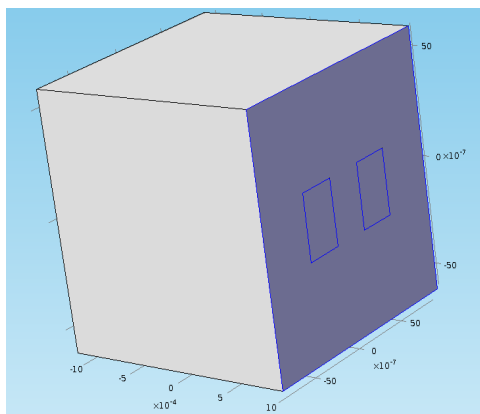
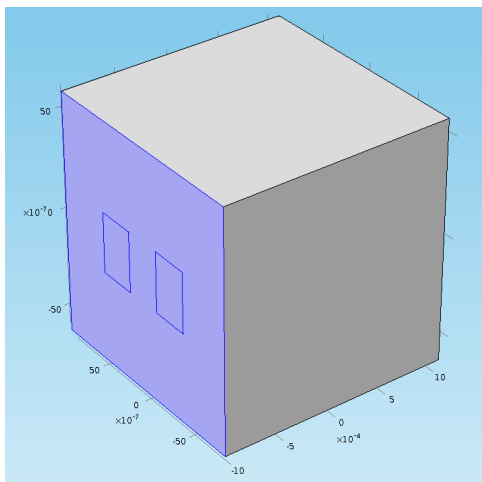
2 仅选择边界 16–18，如右图所示。

3 前往端口的设置窗口，从端口属性栏的端口类型列表选择数值。

复制并粘贴该端口。

端口 4

1 右键单击端口 3，并选择生成副本 。



网格

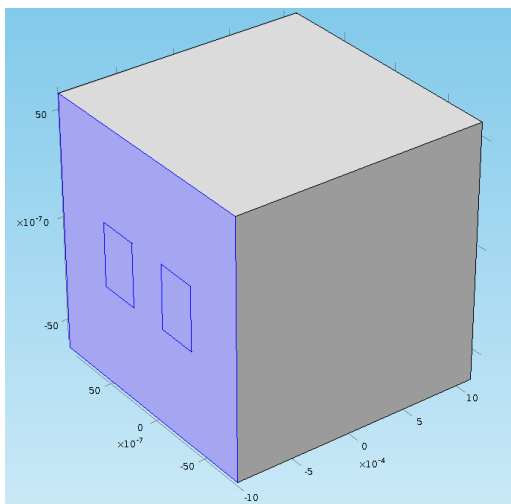
通过在输入边界上定义三角形网格来建立网格，然后将该网格沿波导结构进行扫掠。

自由剖分三角形 1

- 1 在**网格**工具栏上单击**边界** ，并选择**自由剖分三角形网格** 。
- 2 仅选择边界 1、5 和 10，如右图所示。

尺寸 1

- 1 右键单击**自由剖分三角形网格 1**  节点，并选择**尺寸** 。设置最大网格单元尺寸为一个波长，这将足够解析模式。



- 2 在尺寸的**设置**窗口中找到**单元尺寸**栏，单击**定制**单选按钮。
- 3 找到**单元尺寸**参数栏，选中**最大单元尺寸**复选框，并在相关文本框中输入 $w1$ 。
- 4 最后选中**最小单元尺寸**复选框，在对应的文本框中输入 $w1/2$ 。

单元尺寸

校准:

普通物理

☐ 预定义 ☐ 常规

☒ 定制

单元尺寸参数

☒ 最大单元尺寸:

w1 m

☒ 最小单元尺寸:

w1/2 m

扫掠 1

沿波导扫掠网格，二十个单元将足够解析出现的模式耦合。

- 1 在**网格**工具栏上单击**扫掠** 。

尺寸

- 1 在**模型开发器**窗口的**网格 1** 下单击**尺寸** 。
- 2 在尺寸的**设置**窗口中找到**单元尺寸**栏，单击**定制**单选按钮。
- 3 找到**单元尺寸**参数栏，在**最大单元尺寸**文本框中输入 $len/20$ 。

4 单击**构建所有**按钮 。

设置

尺寸

 构建选定  全部构建

标签:

单元尺寸

校准:

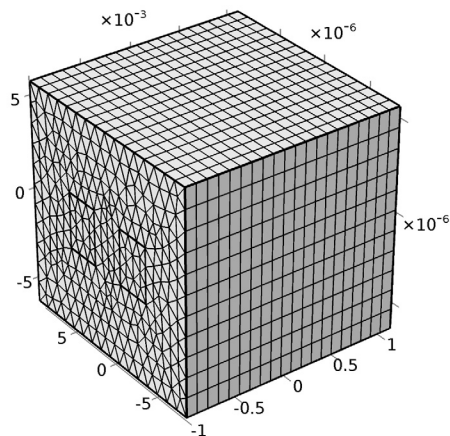
☐ 预定义

☒ 定制

▼ 单元尺寸参数

最大单元尺寸:

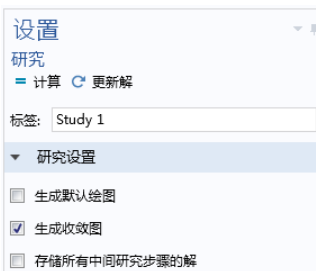
m



研究 1

对此模型，需要生成特殊绘图，因此从清除生成默认绘图的复选框开始。

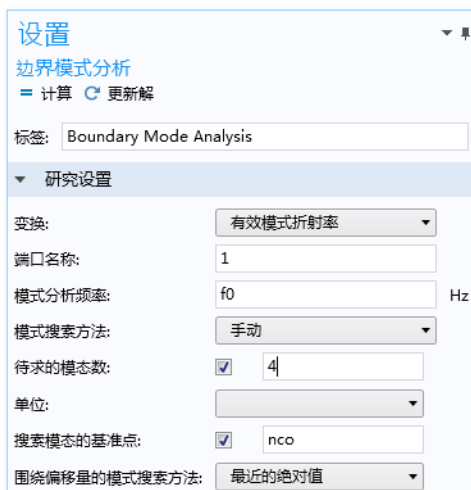
- 1 在**模型开发器**中单击**研究 1** .
- 2 在**研究**的**设置**窗口中找到**研究设置**栏，清除**生成默认绘图**复选框。



步骤 1: 边界模式分析

现在，分析四个最低阶模式。其中前两个模式将是对称的。由于波导截面是正方形，将有一个 z 向极化的模式和一个 y 向极化的模式。模式三和四将是反对称的，一个 z 向极化和一个 y 向极化。

- 1 在**模型开发器**窗口的**研究 1** 下单击**步骤 1: 边界模式分析** .
- 2 在**边界模式分析**的**设置**窗口中，找到**研究设置**栏，选中待求的**模式数**复选框，并在对应的文本框中输入 4。可找出四个最低阶模式。
- 3 在**搜索模式的基准点**设置中，选中复选框并在文本框中输入 n_{co} ，以搜索有效折射率接近波导芯层的模式。
- 4 在**模式分析频率**文本框中输入 f_0 。



- 5 为了只计算边界模式分析步骤，右键单击**步骤 1：边界模式分析** ，并选择**计算选定步骤** 。

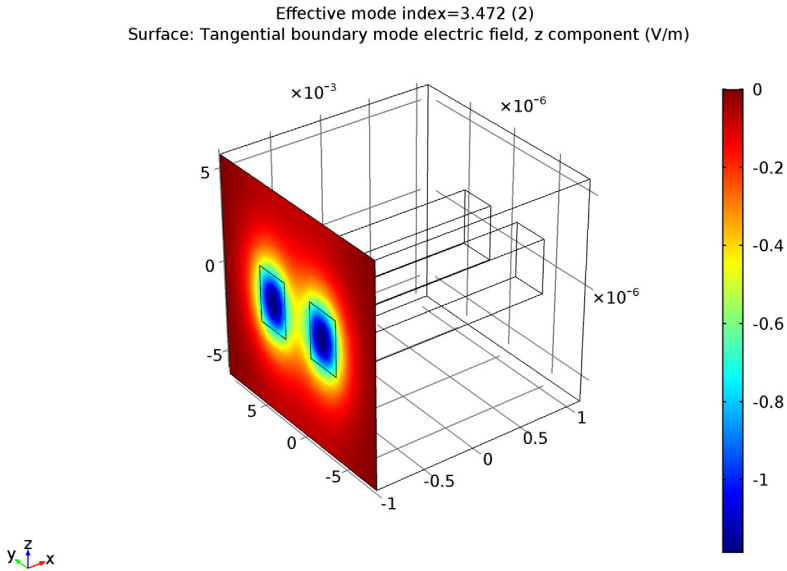
结果

创建一个三维表面绘图组来查看不同的模式。

三维绘图组 1

- 1 在**主屏幕**工具栏上，单击**添加绘图组** ，并选择**三维绘图组** 。
- 2 在**三维绘图组 1** 工具栏上选择**表面** 。
现在，先查看 z 向极化的模式。
- 3 在**表面**的**设置**窗口中，单击**表达式**栏右上角的**替换表达式** 。从菜单中找到并选择**变量模型 > 组件 1 > 电磁波，波束包络 > 边界模式分析 > 切向边界模式电场 > 切向边界模式电场，z 分量 (ewbe.tEbm1z)**。
- 4 在**模型开发器**中单击**三维绘图组 1** 。
- 5 在**三维绘图组**的**设置**窗口中找到**数据**栏。从**有效模式折射率**列表中选择最大有效折射率。这是列表中的最后一个值。由于模式（几乎）是成对衰减的，因此选择 3.472 (2)。

6 单击**绘制**按钮 。下图显示了 z 向极化的对称模式（与**结果与讨论**中的图 11 相同）。

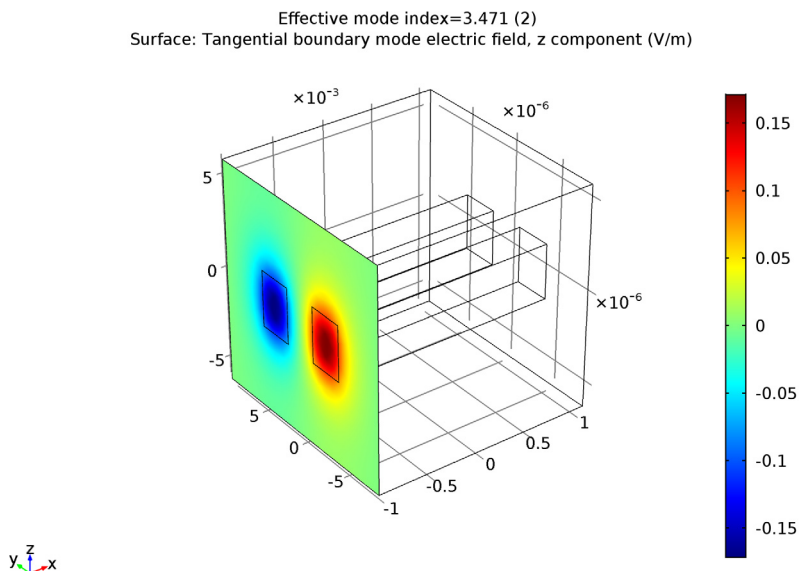


请注意，图像可能看起来与上图不同，因为图像显示了边界模式电场的实部，计算得到的复电场可能会有一个与上图不同的相位因子。因此，可以在波导芯层位置处显示最小（蓝色）或最大（红色）的场。然而，由于这是对称模式，两个波导芯层都将有同样的场值。

任意相位因子的另一结果是：在绘图中显示的电场实部大小可能与上图显示的结果有所不同。

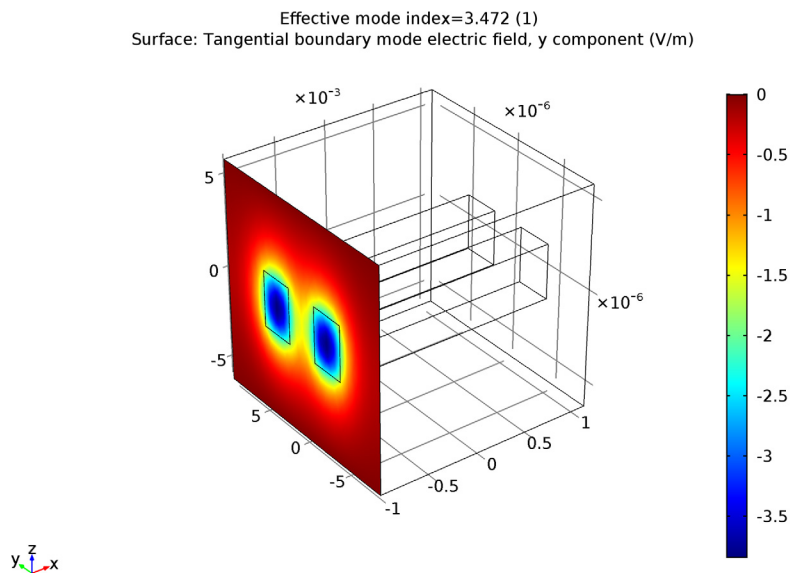
7 从**有效模式折射率**列表中选择第三大的有效折射率。这是列表中的第二个值 (3.471 (2))。

- 8 单击**绘制**  按钮。下图显示了 z 向极化的反对称模式（与**结果与讨论**中的图 12 相同）。



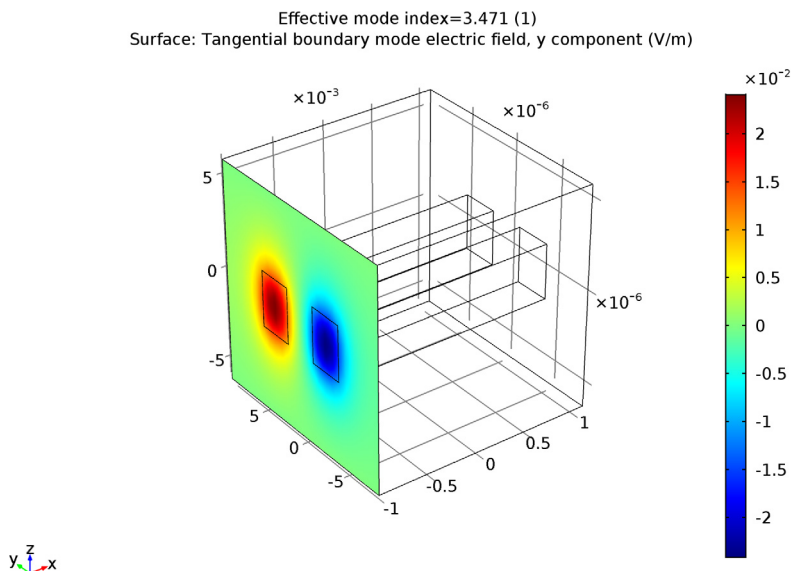
- 9 在**模型开发器**窗口的**三维绘图组 1** 下单击**表面 1** .
- 10 从**表面**的设置窗口找到**表达式**栏，在**表达式**文本框中输入 `ewbe.tEbm1y`，以绘制 y 向极化的模场。
- 11 在**模型开发器**窗口中单击**三维绘图组 1** .
- 12 在**三维绘图组**的设置窗口中找到**数据**栏。从**有效模式折射率**列表中选择第二大的有效折射率。这是列表中的第三个值 (3.472 (1))。

13 单击**绘制**按钮 。下图显示了 y 向极化的对称模式（与**结果与讨论**中的图 13 相同）。



14 从**有效模式折射率**列表中选择最小的有效折射率（列表中的第一个值 3.471 (1)）。

15 单击 **绘制** 按钮 。下图显示了 y 向极化的反对称模式（与 [结果与讨论](#) 中的图 14 相同）。



派生值

需要复制不同模式的有效折射率，并在边界模式分析的不同端口中使用它们。

- 1 在 **结果** 工具栏上选择 **全局计算** .
- 2 在 **全局计算** 的 **设置** 窗口中找到 **表达式** 栏，并在 **表达式** 文本框中输入 `ewbe.beta_1`。变量 `ewbe.beta_1` 是与第一个端口有关的传播常数。
- 3 单击 **计算** 按钮 .

现在，将表中的所有信息复制到剪贴板。然后，将该信息粘贴到您常用的文本编辑器，以便稍后在边界模式分析步骤中方便地输入这些值。

4 在表单窗口中单击**全精度** 8.85×10^{-12} 。

消息	进度	日志	Table 1
			
Effective mode index	Propagation constant (rad/m)		
3.471420149475651	1.8966587893450815E7		
3.471421904497254	1.8966587893450815E7		
3.471663528563964	1.8966587893450815E7		
3.4716716970949366	1.8966587893450815E7		

5 在表单窗口中单击**复制表单和题头到剪贴板** 。

6 将剪贴板的内容粘贴到文本编辑器，供以后参考。

研究 1

步骤 1：边界模式分析

- 1 在模型开发器窗口的**研究 1**下单击**步骤 1：边界模式分析** 。
- 2 前往**边界模式分析**的设置窗口，找到**研究设置**栏，在待求的模式数文本框中输入 1。
- 3 在**搜索模式的基准点**文本框中输入最大的有效折射率 3.4716716970949366。可以在文本编辑器中选择该值，然后将其复制并粘贴在此。最后几位数字可能与在此写入的不同。

步骤 3：边界模式分析 1

- 1 右键单击**步骤 1：边界模式分析** ，并选择**生成副本** 。
- 2 在**边界模式分析**的设置窗口中，找到**研究设置**栏。在**搜索模式的基准点**文本框中输入（或复制并粘贴）3.471421904497254。这应该是第三大的有效折射率。最后几位数字可能与在此写入的不同。
- 3 在**端口名称**文本框中输入 2。

步骤 4：边界模式分析 2

- 1 选择两个边界模式分析，**步骤 1：边界模式分析**  和**步骤 3：边界模式分析 3** 。
- 2 在模型开发器中，右键单击**步骤 1：边界模式分析** ，并选择**生成副本** 。

- 3 对于节点**步骤 4: 边界模式分析 2**，前往**边界模式分析**的设置窗口，找到**研究设置**栏，并在**端口名称**文本框中输入 3。

步骤 5: 边界模式分析 3

- 1 在**模型开发器**的**研究 1**下单击**步骤 5: 边界模式分析 3** 。
- 2 前往**边界模式分析**的设置窗口，找到**研究设置**栏，并在**端口名称**文本框中输入 4。

步骤 2: 频域

- 1 在**模型开发器**的**研究 1**下单击**步骤 2: 频域** 。
- 2 前往**频域**的设置窗口，找到**研究设置**栏，并在**频率编辑框**中输入 f_0 。
- 3 最后，将**步骤 2: 频域**移至最后的研究步骤，通过右键单击**步骤 2: 频域** ，并选择**下移** （三次）或拖曳**步骤 2: 频域**至最后的研究步骤来实现。在移动之后，求解序列应该看起来与下面的序列相似：

- 研究: Study 1
 -  步骤 1: 边界模式分析: Boundary Mode Analysis
 -  步骤 2: 边界模式分析: Boundary Mode Analysis 1
 -  步骤 3: 边界模式分析: Boundary Mode Analysis 2
 -  步骤 4: 边界模式分析: Boundary Mode Analysis 3
 -  步骤 5: 频域: Frequency Domain

- 4 右键单击**研究 1** ，并选择**计算** 。

结果

三维绘图组 1

删除表面图，将其替换为电场模的切面图。

- 1 在**模型开发器**窗口的**三维绘图组 1**中，右键单击**表面 1** ，并选择**删除** ，然后在**确认删除**对话框中单击**确定**。
- 2 在**三维绘图组 1**工具栏上选择**切面** 。
- 3 在**切面**的设置窗口中找到**平面数据**栏，从**面列表**中选择 **xy- 平面**。
- 4 在**面**文本框中输入 1。
- 5 右键单击**切面 1** ，并选择**变形** 。

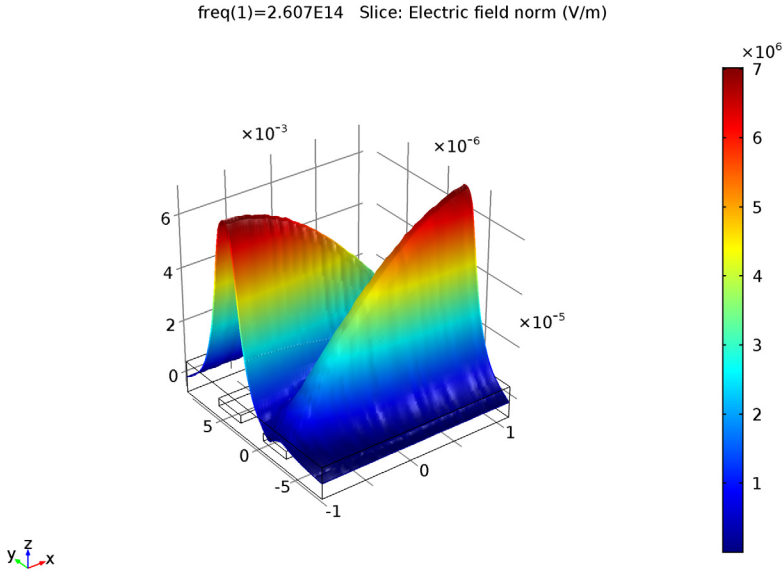
6 在变形的设置窗口中，找到表达式栏，在 z 分量文本框中输入 `ewbe.normE`。

7 单击绘制按钮 。

8 单击视图按钮  旁边的向下小箭头，然后从下拉菜单中选择切换到视图 1 按钮。



9 在图形工具栏上单击缩放到窗口大小按钮 。下图显示了光如何从激励波导耦合至未激励波导（与结果与讨论中的图 15 相同）。



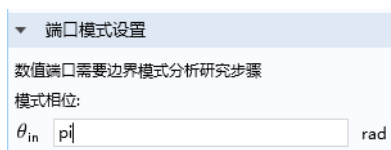
电磁波，波束包络

端口 2

为激励另一个波导，设置激励端口之间的相位差为 π 。

1 在模型开发器中的电磁波，波束包络下，单击端口 2 。

- 2 在端口的设置窗口中，找到端口模式设置栏，在模式相位 Θ_{in} 文本框中输入 pi。



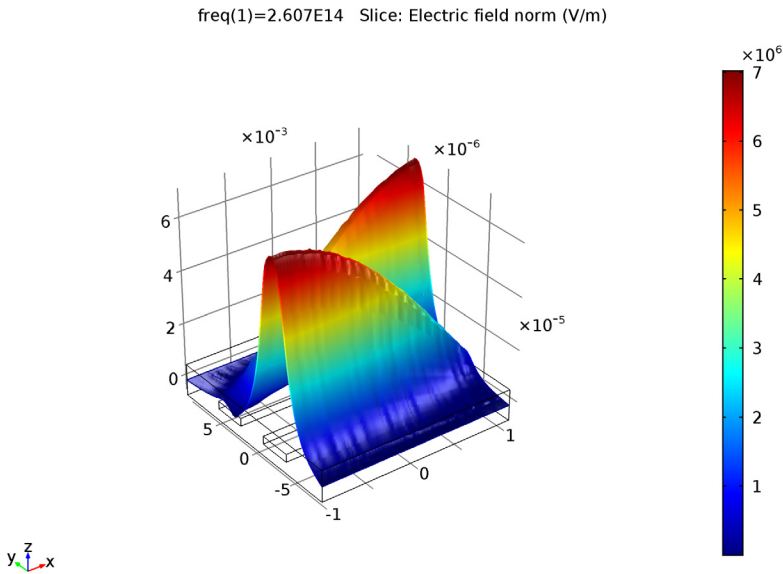
研究 1

在主屏幕工具栏上选择计算 。

结果

三维绘图组 1

现在另一个波导被激励，且与之前的情况相比，耦合发生在反方向。下图再现了[结果与讨论](#)中的图 16。



波动光学模块的简介到此结束。请参阅 Wave Optics Module User's Guide，进一步了解理论部分。