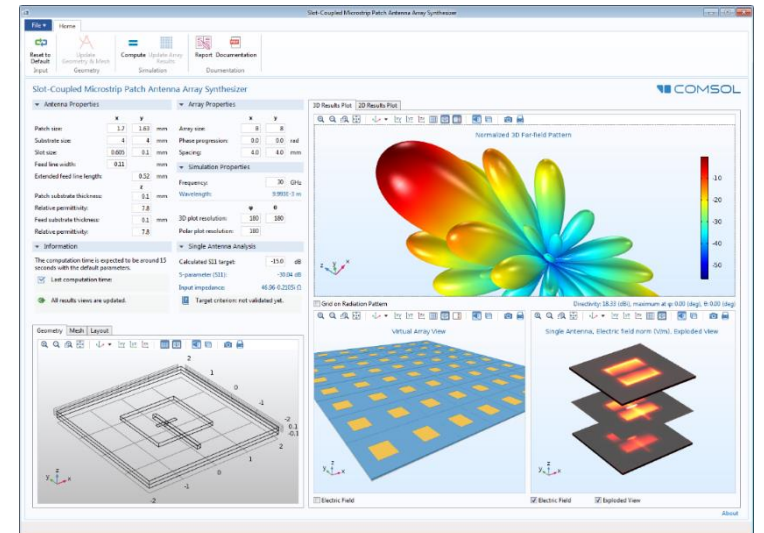


声明：© 2019, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL 公司所有。课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

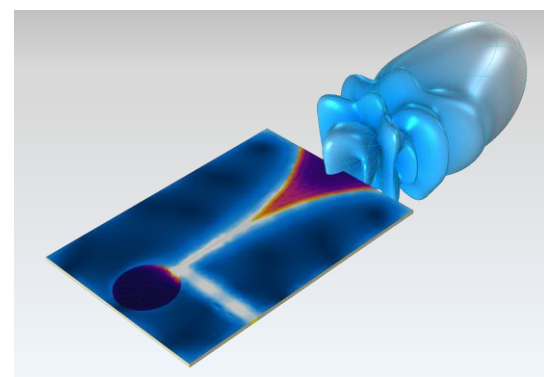
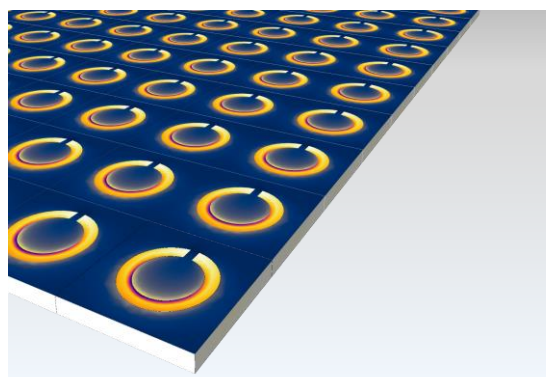
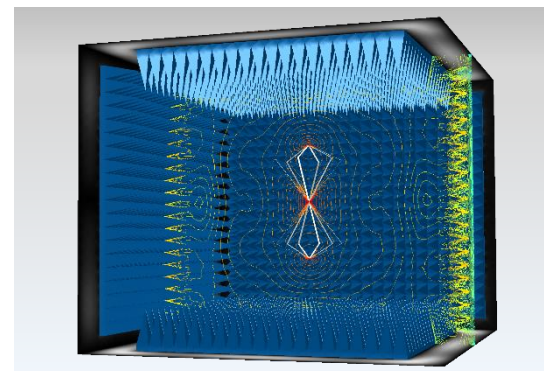
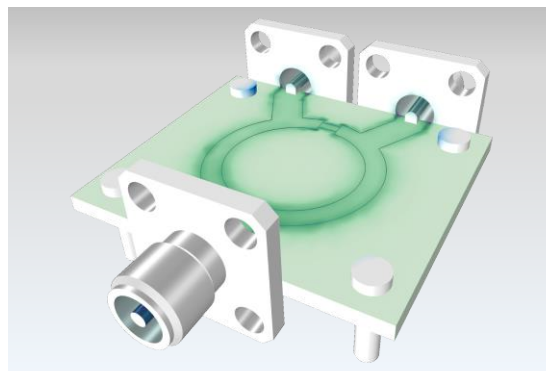
COMSOL Multiphysics® 射频 (RF) 及微波建模 Part IV

鲍 伟
COMSOL 中国
应用工程师



日程

- 模块简介
- 谐振结构
- 波导和传输线
- 无源器件、耦合器和滤波器
- 天线
- 散射分析
- 非线性材料模拟
- 周期性结构
- 电磁加热
- 铁磁应用



周期性问题示例

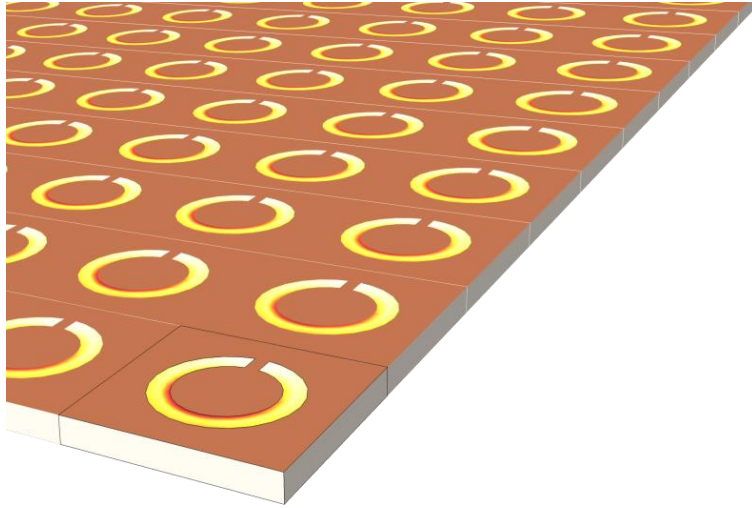
- 任何在一个、两个或所有三个维度重复的结构都能视为周期性，可以使用 Floquet 周期性边界条件只分析单个单元

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{E}_s \exp(-j \mathbf{k}_F \cdot (\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_s))$$

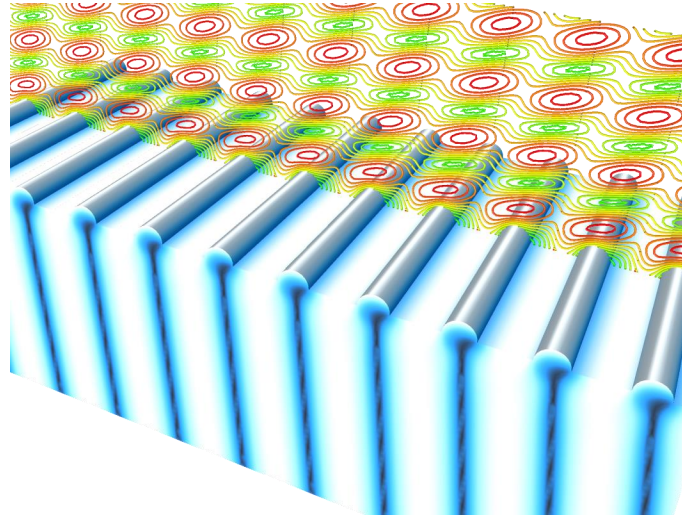
- 典型示例

- 光栅
- 频率选择表面
- 电磁带隙结构

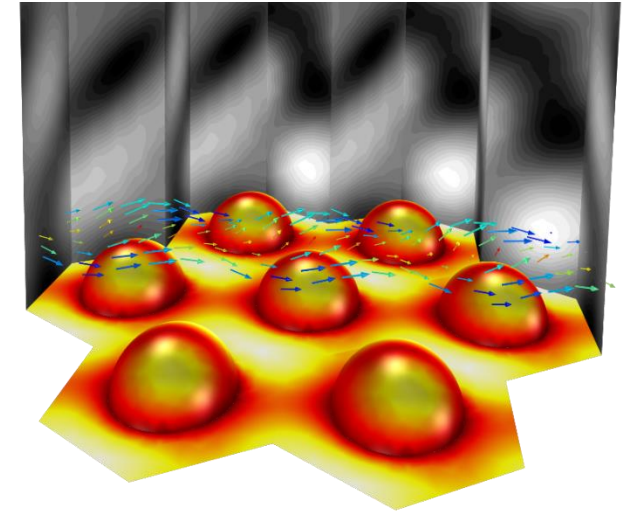
周期性结构



频率选择表面
周期性互补开口环谐振器



表面等离激元线光栅



六边形光栅

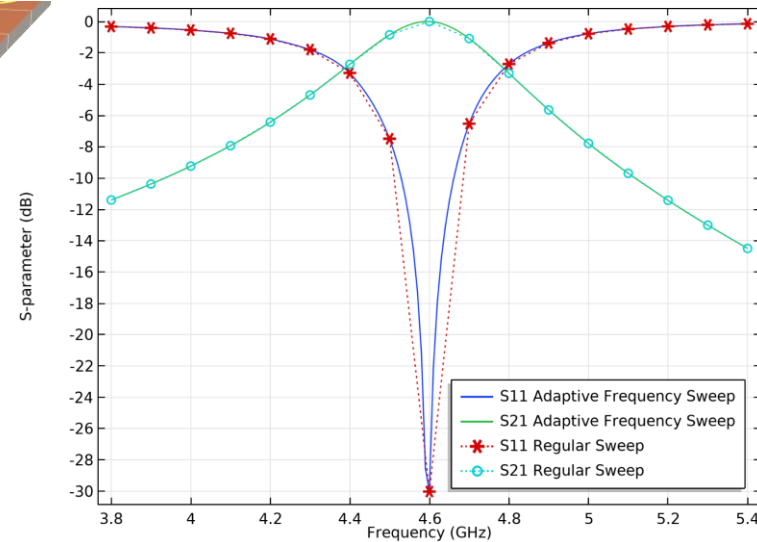
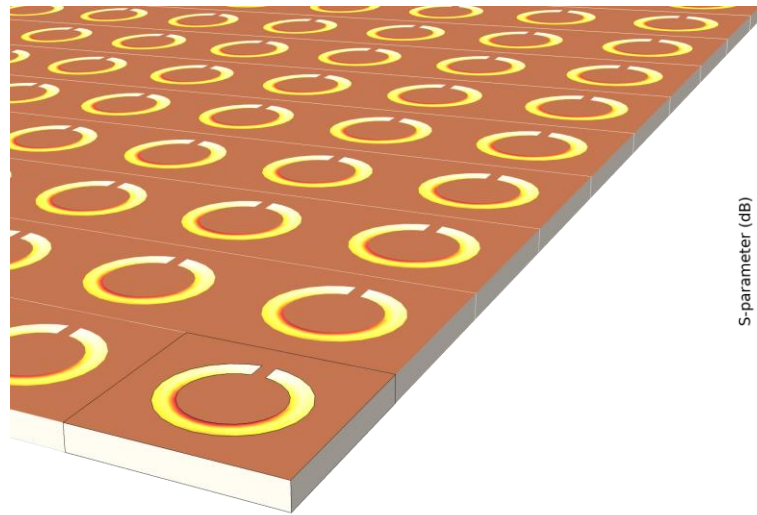
<https://cn.comsol.com/model/frequency-selective-surface-periodic-complementary-split-ring-resonator-15711>

<https://cn.comsol.com/model/plasmonic-wire-grating-rf-10032>

<https://cn.comsol.com/model/hexagonal-grating-rf-22341>

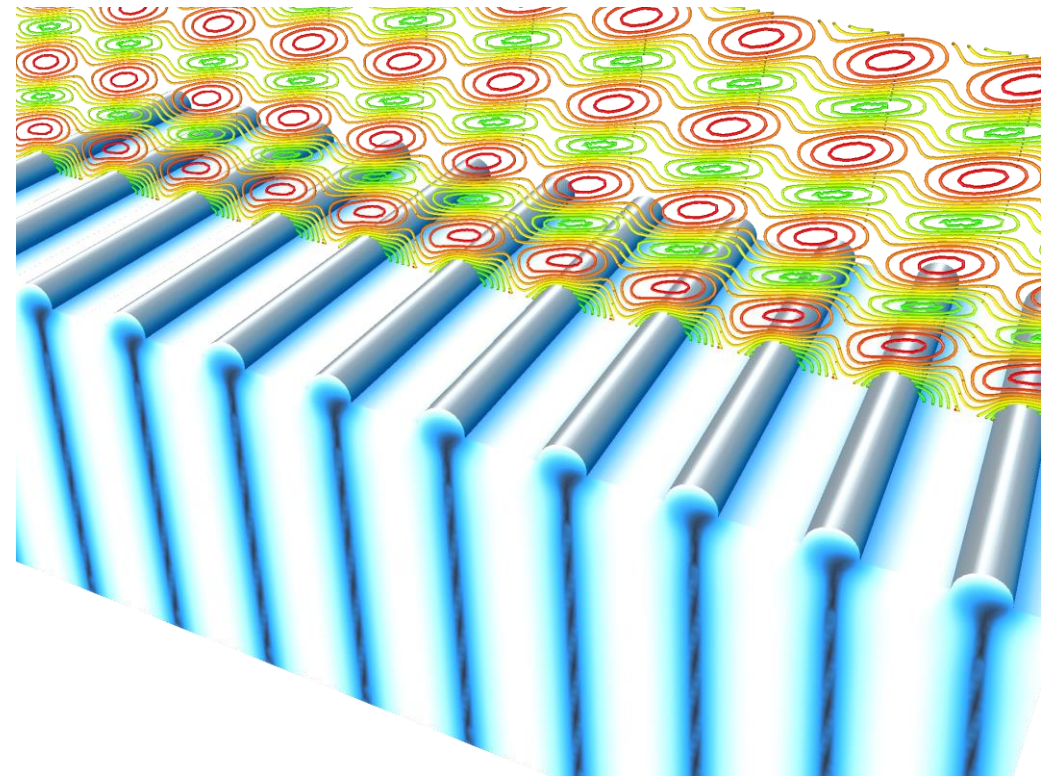
频率选择表面，CSRR

- 有周期性边界条件的互补开环谐振器 (CSRR) 的一个单元模拟无穷大二维阵列
- 内部端口边界与完美匹配层结合吸收高阶模式



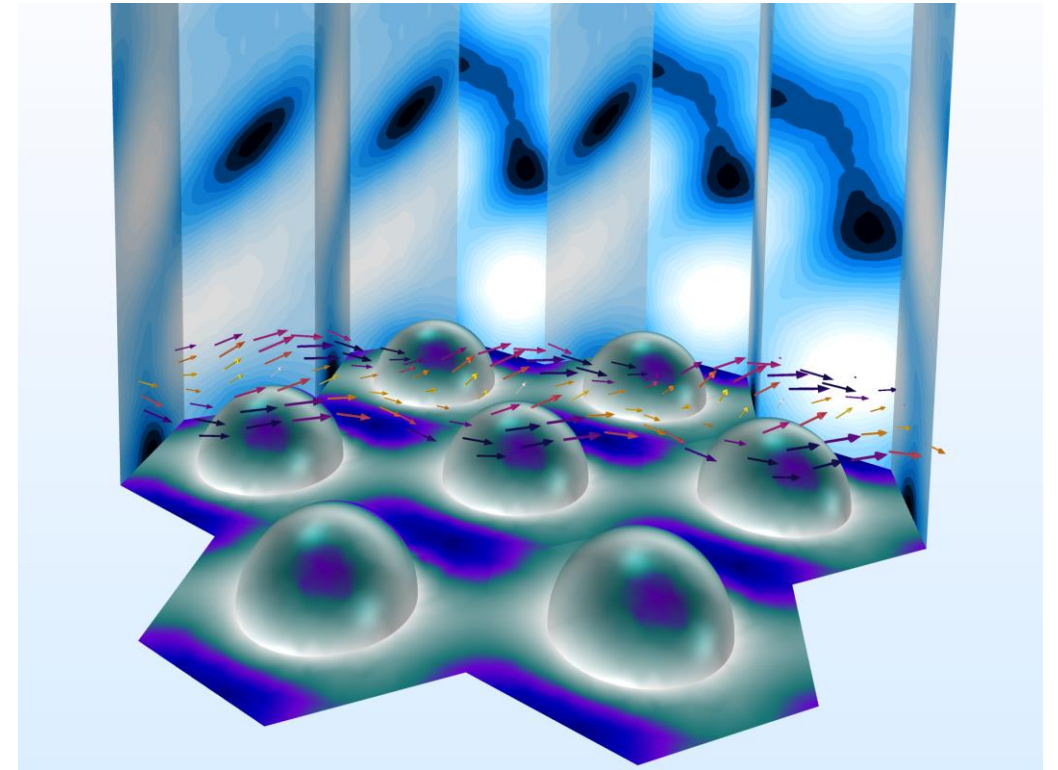
表面等离激元线光栅

- 基底上的银圆柱二维阵列图案由一个使用 Floquet 周期性的单元来模拟
- 捕捉了高阶衍射
- 二维模型使用周期性端口很容易就能扩展为三维



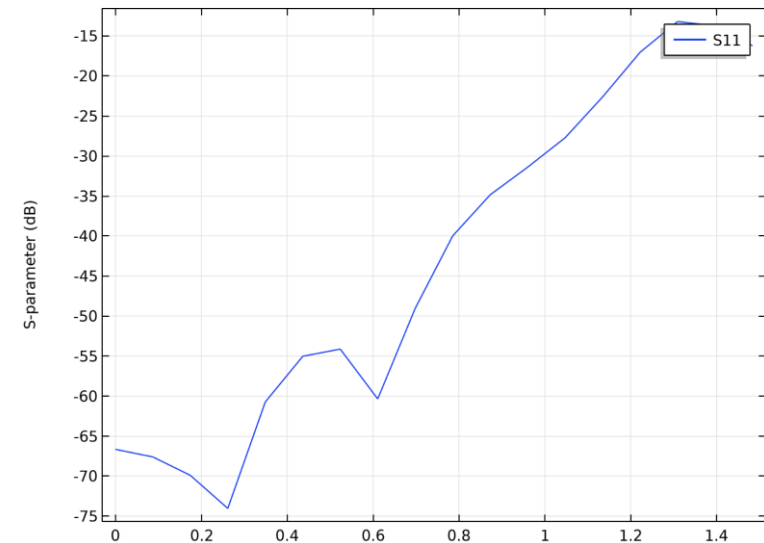
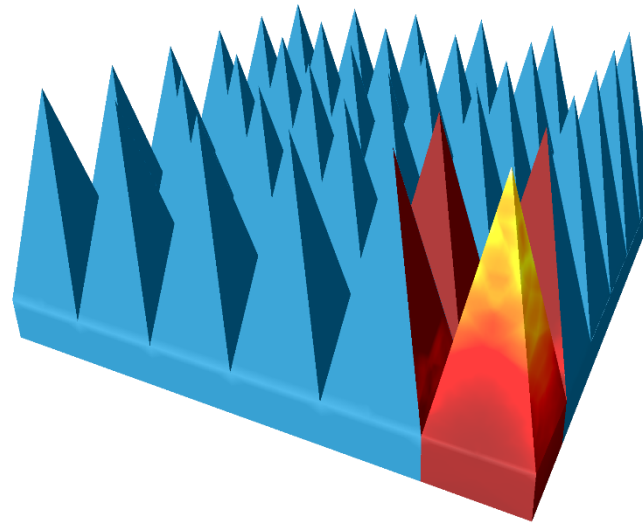
六边形光栅

- 平面波入射至六边形光栅后发生反射
- 光栅单元包含一个突出的半球
- 计算了一些波长下不同衍射阶次的散射系数



金字塔形吸收体

- 金字塔形吸收体的无穷大二维阵列
- 单元侧面使用周期性边界条件模拟
- 损耗材料模仿载碳泡沫的电磁属性

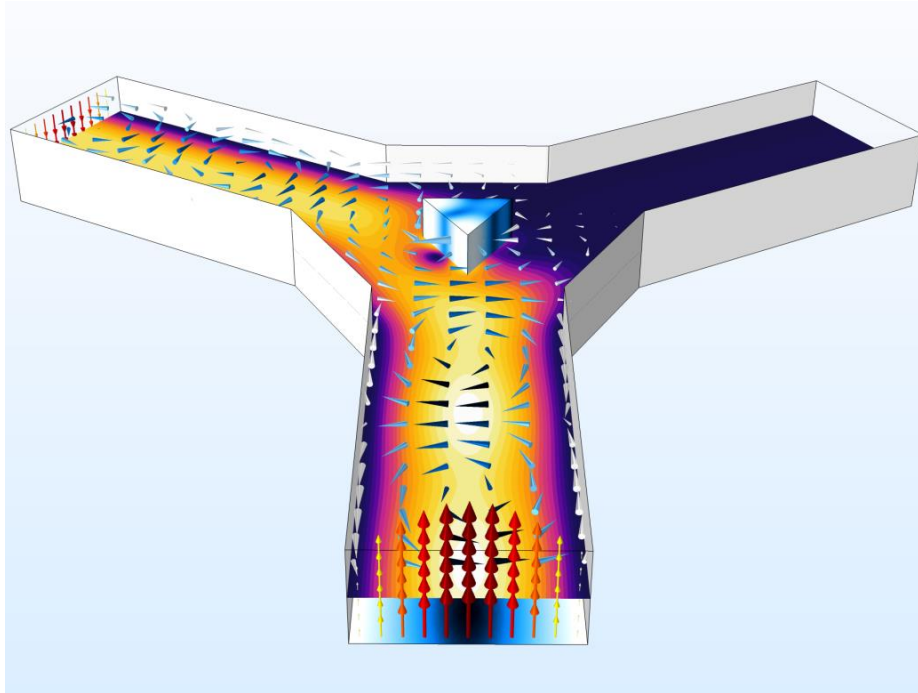


铁磁示例模型

- COMSOL 能够定义任何材料为完全各向异性。通过用户定义的张量形式的相对磁导率，分析铁磁器件

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 (\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) \mathbf{E} = \mathbf{0}$$
$$\mu_r = \begin{pmatrix} \mu_{rxx} & \mu_{rxy} & \mu_{rxz} \\ \mu_{ryx} & \mu_{ryy} & \mu_{ryz} \\ \mu_{rzx} & \mu_{rzy} & \mu_{rzz} \end{pmatrix}$$

铁磁应用



有损耗的铁氧体三端口环形器

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix}$$

<https://cn.comsol.com/model/lossy-ferrite-circulator-10302>
<https://cn.comsol.com/model/three-port-ferrite-circulator-968>

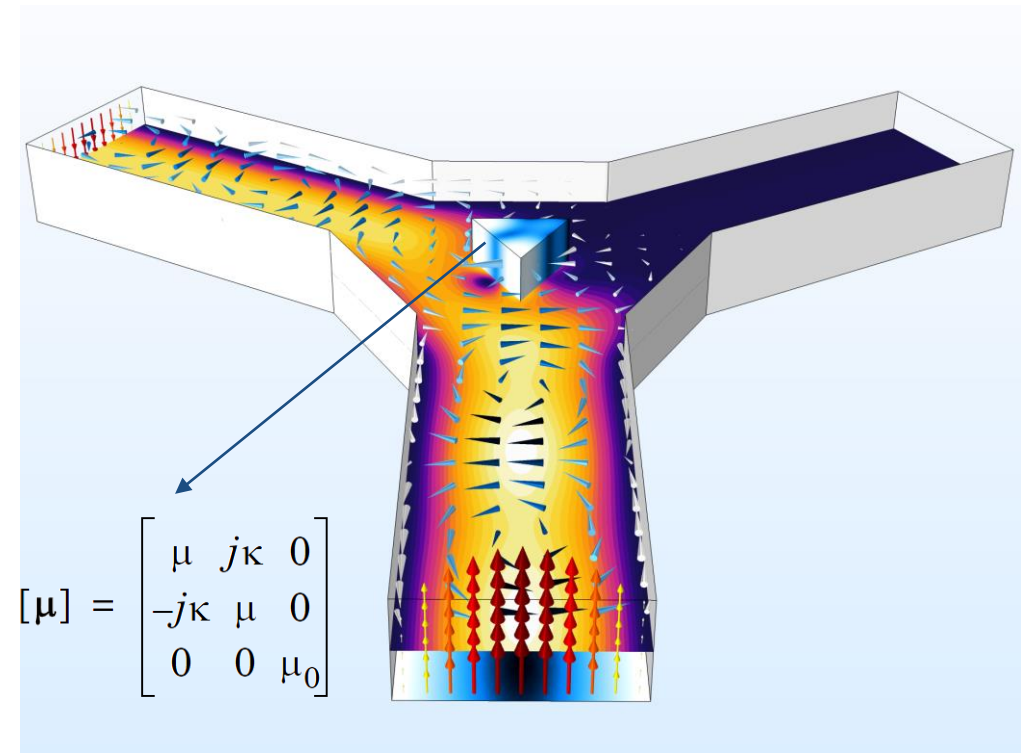
铁磁器件

circulator

lossy_circulator_3d

有损耗的铁氧体三端口环形器

- 微波环形器使用各向异性和有损耗的铁氧体
- 假定外部偏置磁场下的铁氧体柱位于环形器中心
- 非互易行为提供了隔离



<https://cn.comsol.com/model/lossy-ferrite-circulator-10302>
<https://cn.comsol.com/model/three-port-ferrite-circulator-968>

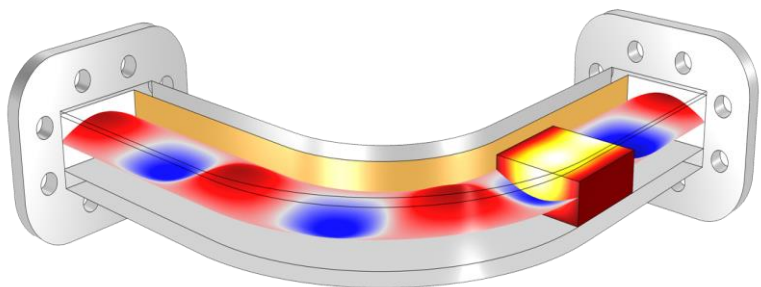
电磁加热示例

- 电磁波与任何材料的相互作用都将有一些损耗并导致一段时间内温度上升。任何从求解电磁问题计算得到的损耗能够双向耦合至传热方程

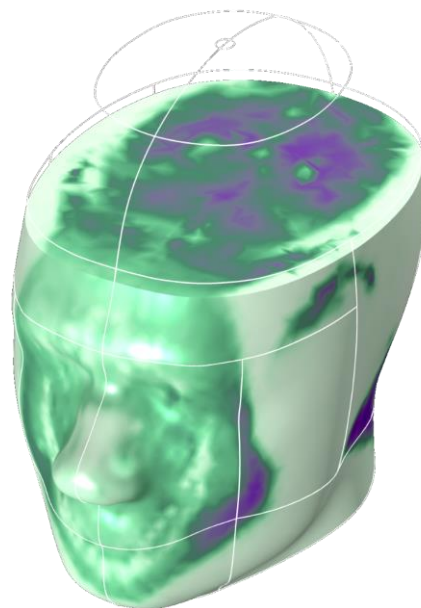
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_{\text{Electromagnetic Losses}}$$

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• 典型示例 | <ul style="list-style-type: none">• 微波滤波腔体中的热飘移• 微波炉• 活体组织中吸收的辐射• 肿瘤消融 |
|--|---|

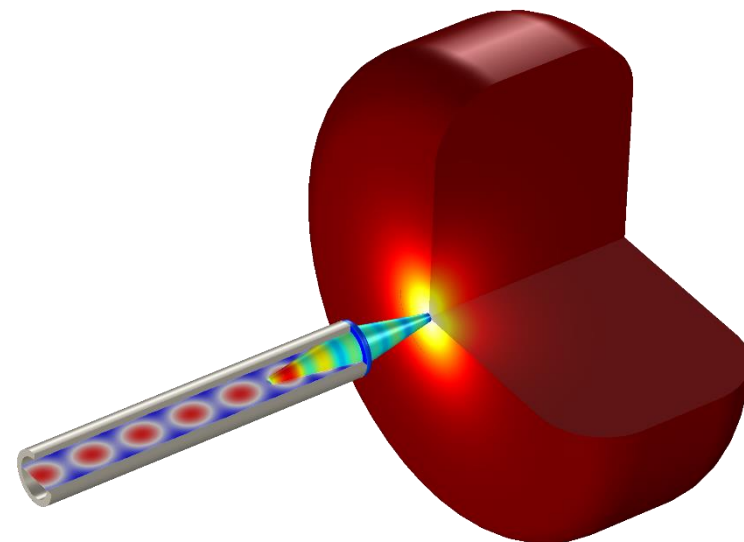
电磁加热



波导中的介电块被加热



人脑中吸收的辐射 (SAR)



用圆锥形介电探针诊断皮肤癌

<https://cn.comsol.com/model/rf-heating-6078>

<https://cn.comsol.com/model/specific-absorption-rate-sar-in-the-human-brain-2190>

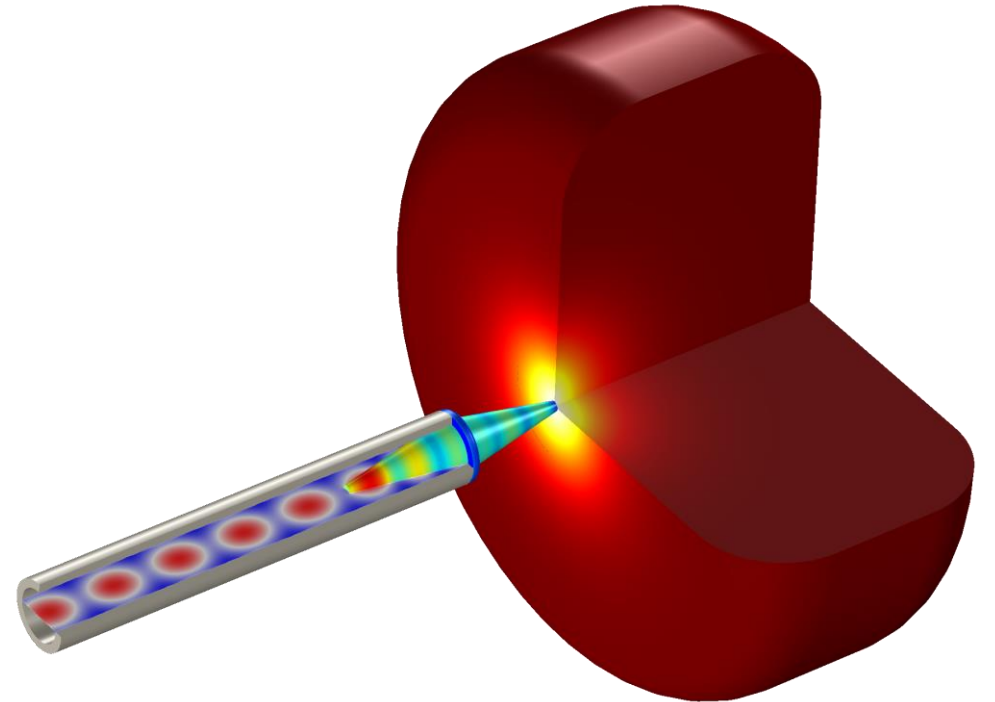
<https://cn.comsol.com/model/modeling-a-conical-dielectric-probe-for-skin-cancer-diagnosis-18693>

微波加热

conical_dielectric_probe
microwave_cancer_therapy
microwave_oven
rf_heating
sar_in_human_head

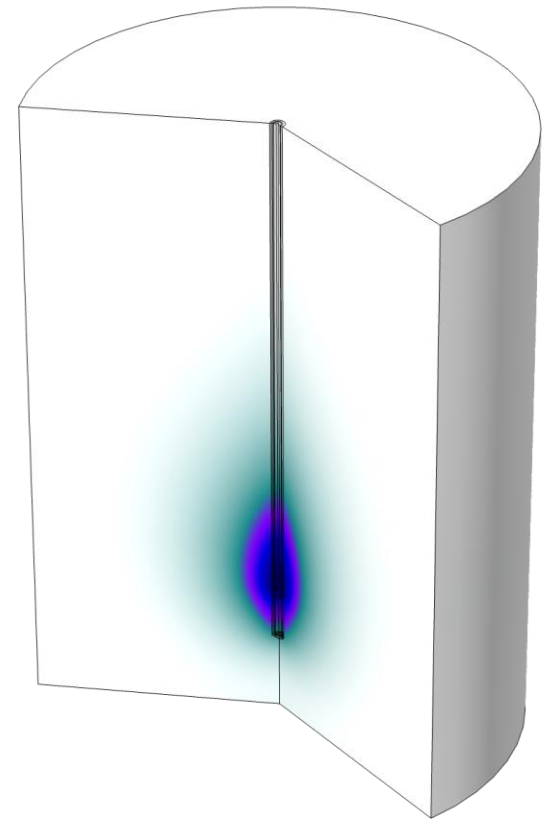
用圆锥形介电探针诊断皮肤癌

- 利用低功率 35 GHz Ka 频带毫米波及其对湿空气的反射率实现非侵入式癌症诊断
- 检测肿瘤部位 S 参数是否异常
- 分析皮肤温度变化和坏死组织分数



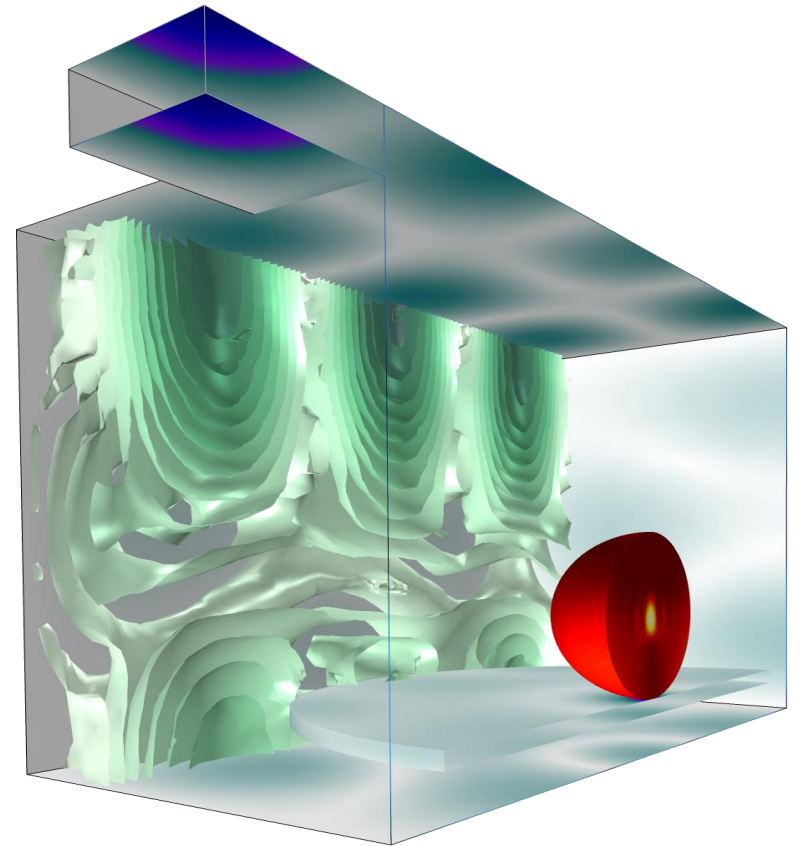
微波癌症疗法

- 同轴电缆及狭缝由聚四氟乙烯套管包裹并形成一个天线
- 天线插入肝脏中
- 组织由天线辐射加热
- 肝脏组织由 Pennes 生物热方程模拟
- 模型求解了：
 - 比吸收率 (SAR)
 - 温度场
 - 辐射场



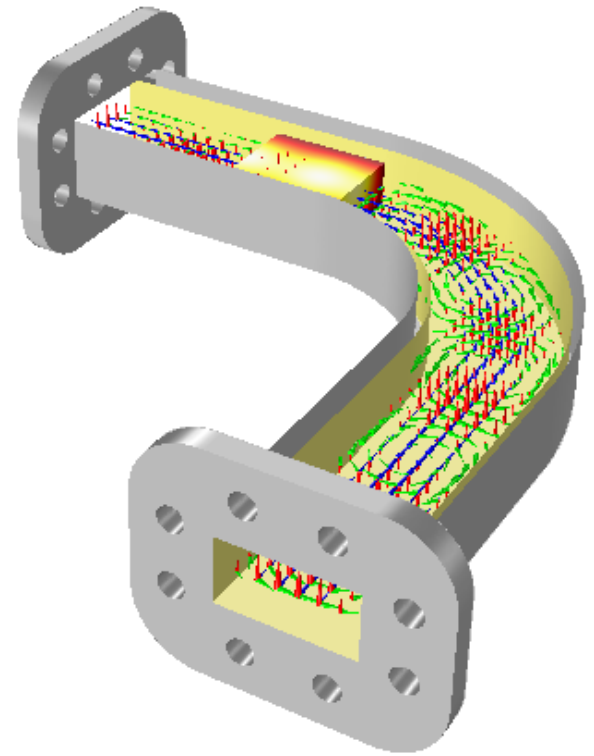
微波炉中的马铃薯

- 微波炉中马铃薯的半对称模型
 - 频域电磁场
 - 瞬态传热问题



波导中的介电块被加热

- 波导中有介电块，波导壁面包裹铜
- 块内和波导壁面上的损耗
- 随温度变化的热学和电学材料属性
- 块和波导结构内计算的温度上升
- 稳态热学解和瞬态热效应两者的仿真



人脑中吸收的辐射 (SAR)

- 手机天线放置在头部旁边
- 头部的介电属性来自扫描数据
- 吸收的辐射和温度上升
- 由 Pennes 生物热方程模拟的组织

