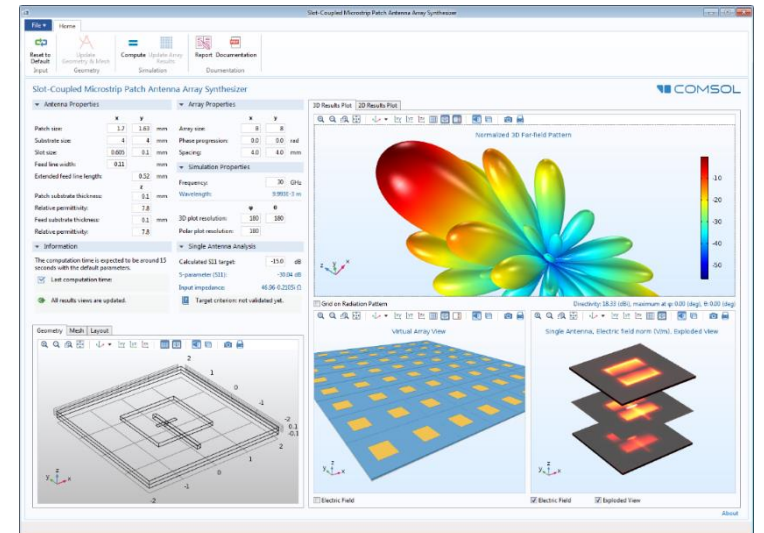


声明：© 2019, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL 公司所有。课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

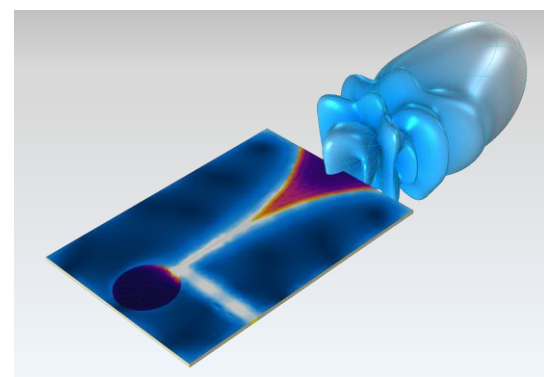
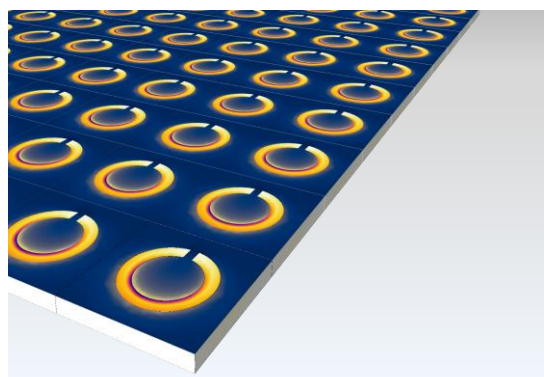
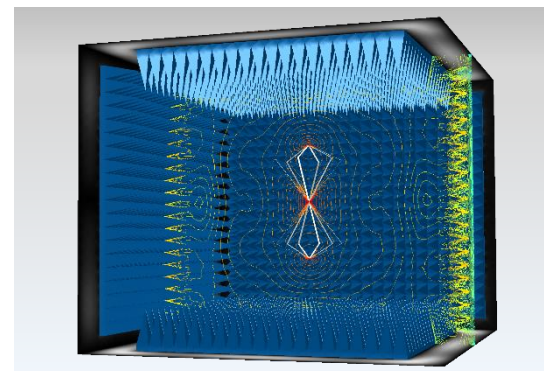
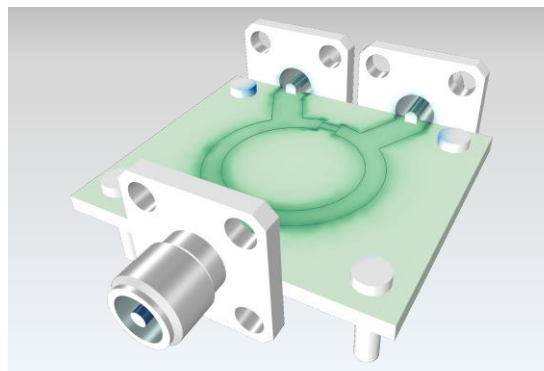
COMSOL Multiphysics® 射频 (RF) 及微波建模 Part III

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



散射问题示例

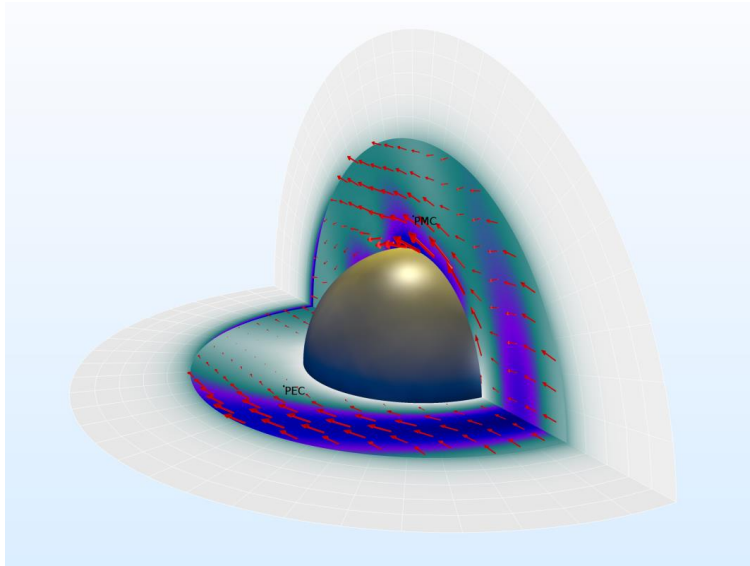
- 一个已知形状的背景电磁场，例如平面波，与各种材料和结构相互作用。目的是找到总场和散射场

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}_{total}) - k_0^2 (\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) \mathbf{E}_{total} = \mathbf{0}$$

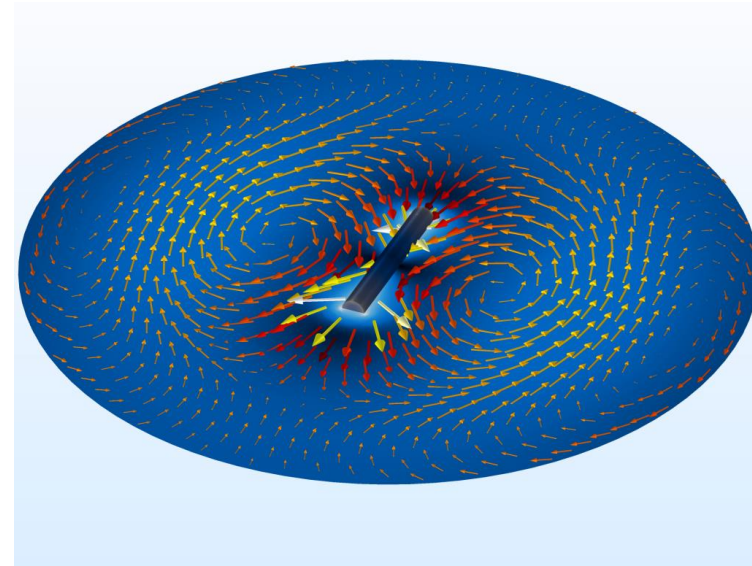
$$\mathbf{E}_{total} = \mathbf{E}_{background} + \mathbf{E}_{scattered}$$

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• 典型示例 | <ul style="list-style-type: none">• Mie 散射• 雷达散射截面 (RCS) 计算 |
|--|--|

散射分析



Mie 散射，金属球的雷达散射截面 (RCS)



探测嵌入介电壳中的金属圆柱的方向

<https://cn.comsol.com/model/computing-the-radar-cross-section-of-a-perfectly-conducting-sphere-10332>

<https://cn.comsol.com/model/detecting-orientation-of-a-metallic-cylinder-embedded-in-a-dielectric-shell-19871>

散射和雷达散射截面

cylinder_orientation

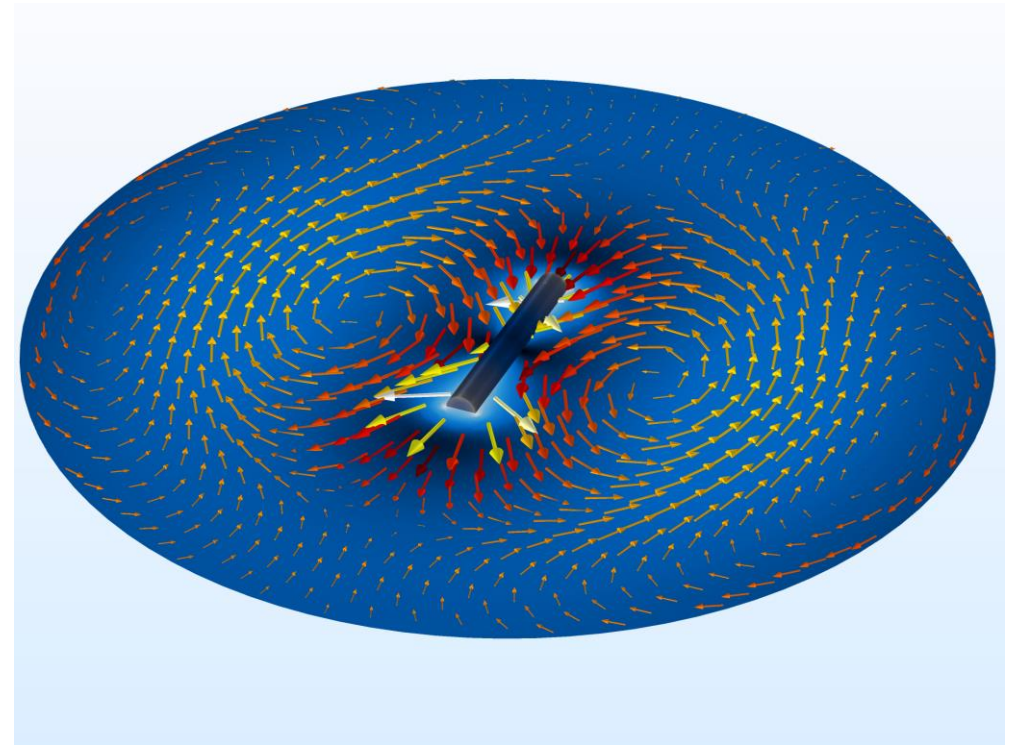
marine_csem

radar_cross_section

rsc_time_explicit

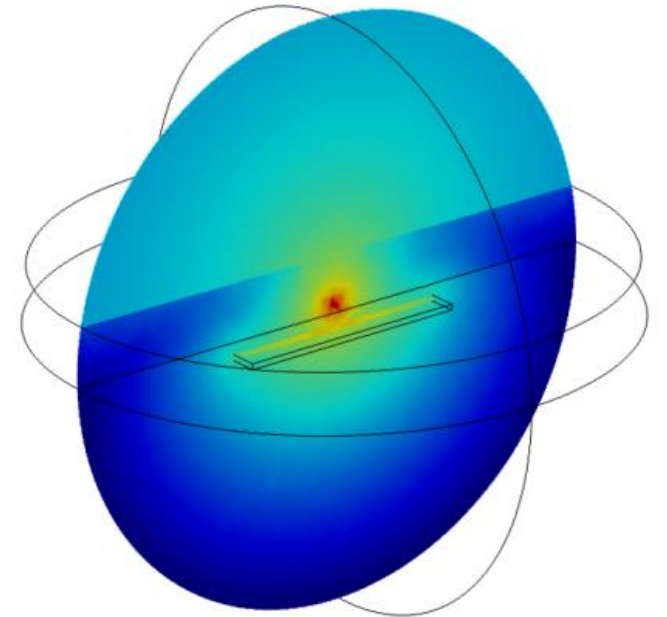
探测金属圆柱的方向

- 定义背景平面波的简单方法
- 隐藏圆柱的方向由偏振依赖导致的散射场强度确认



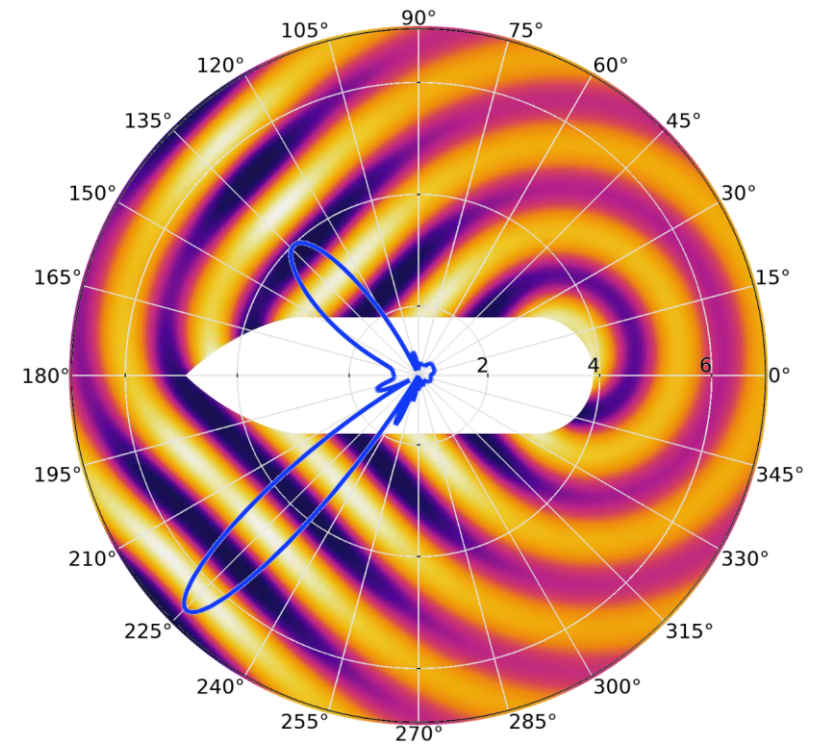
石油勘探的电磁测深法

- 海洋可控有源电磁方法使用一个移动的水平电偶极发射器和一组海底电接收器阵列
- 海底接收器测量由源产生的低频电场
- 一些发射的能量被电阻性储层反射并导致较高的接收信号



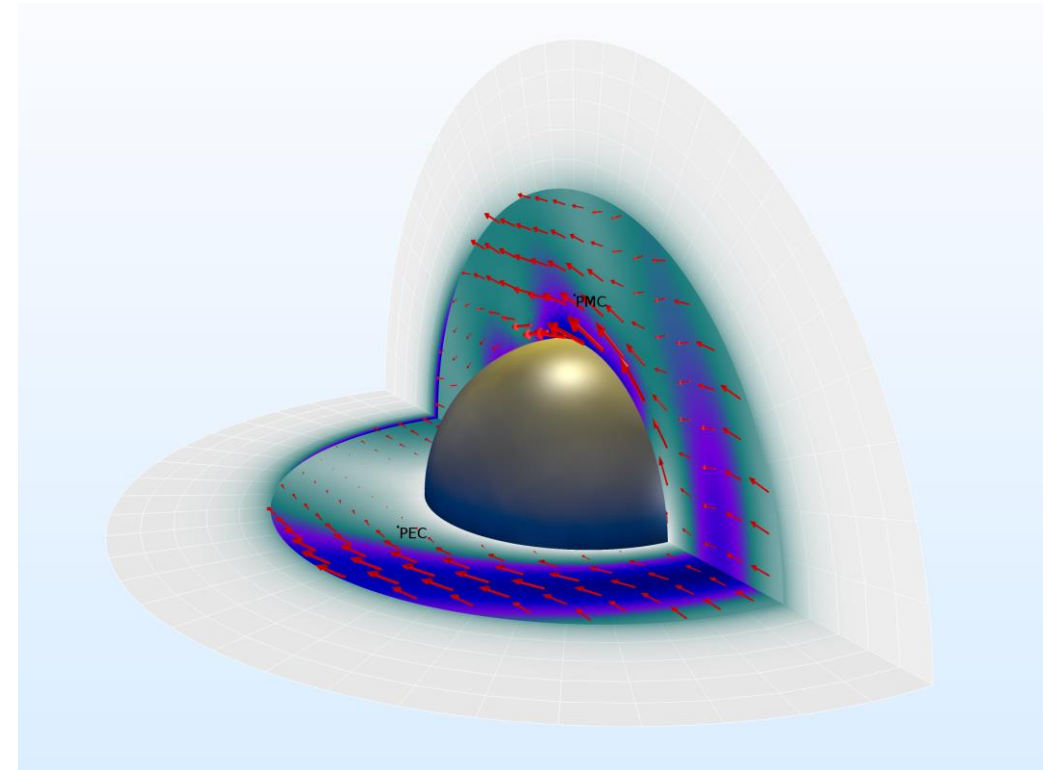
雷达散射截面

- 平面波从所有的角度照射到一个二维扁圆形结构
- 使用散射场公式找到 RCS



Mie 散射，金属球的雷达散射截面

- 将金属球视为完美电导体
- 平面波照射球
- 通过对称简化减少问题大小
- 二阶单元代表高精度的球形
- 完美匹配层 (PML) 截断模拟域
- 远场计算计算了后向散射场



用户定义的电位移示例

- COMSOL 能通过瞬态波动方程产生谐波，使用非线性材料属性

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{A}) + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{D}_r \right) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{D}_r \quad \text{剩余电位移}$$

Drude-Lorentz 色散模型示例

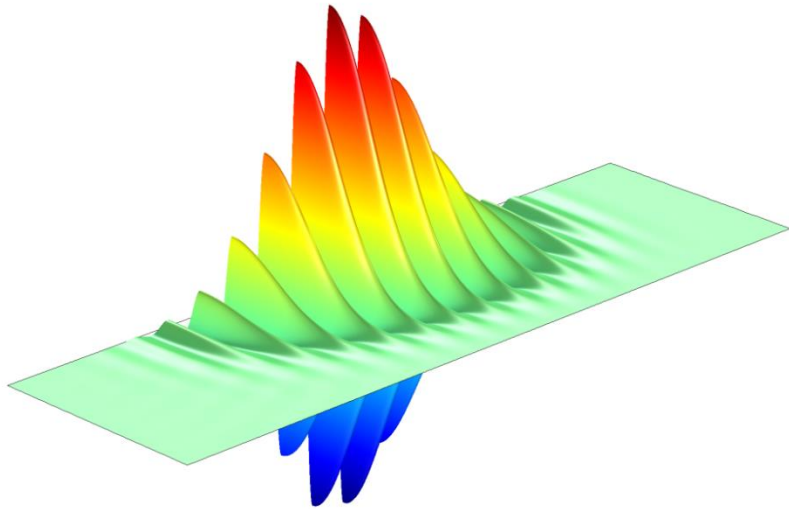
- 模拟色散介质中全瞬态波动方程的能力，例如等离子体和半导体（以及任何可由一组 Drude-Lorentz 谐振项描述的线性介质）

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{A}) + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{D}_r \right) = \mathbf{0}$$

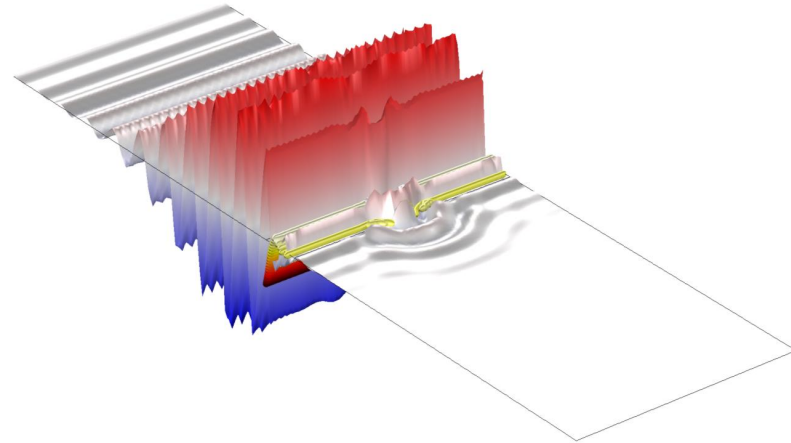
$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \mathbf{E} + \sum_{n=1}^N \mathbf{P}_n$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \Gamma_n \frac{\partial}{\partial t} + \omega_n^2 \right) \mathbf{P}_n = \varepsilon_0 f_n \omega_p^2 \mathbf{E}$$

瞬态非线性/色散模拟



高斯波的二次谐波产生



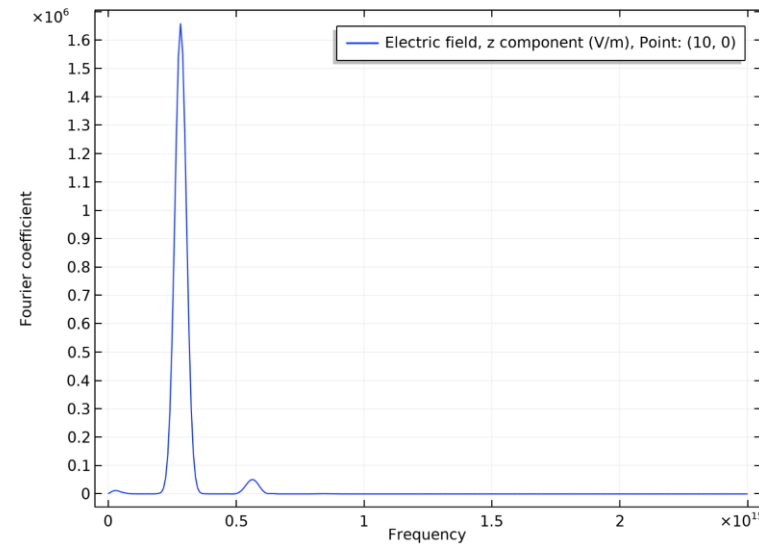
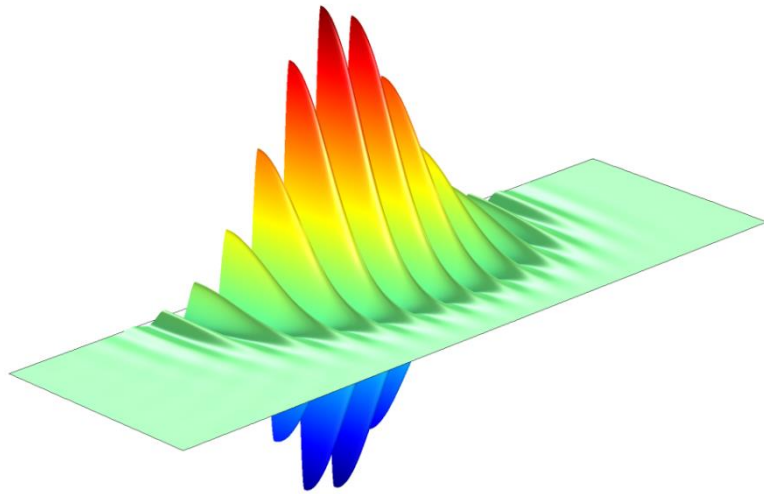
色散 Drude-Lorentz 介质的时域模拟

<https://cn.comsol.com/model/second-harmonic-generation-of-a-gaussian-beam-rf-956>

<https://cn.comsol.com/model/time-domain-modeling-of-dispersive-drude-lorentz-media-rf-3507>

二次谐波产生

- 高斯波束通过光学非线性介质
- 极化强度依赖于电场大小
- 倍频的瞬态非线性模拟



色散 Drude-Lorentz 介质

- 时域瞬态模拟
- 二维 TM 平面波模型
- 单个厚度 $1\mu\text{m}$ 的色散板有一个宽带 $0.5\mu\text{m}$ 的孔
- 周期性边界条件用于模拟狭缝阵列
- 平面波脉冲源拥有平面波前和高斯时间形状

