

光学仿真经典案例集

案例目录和简介（第二册）

注：“含讲解”是指建模和仿真全过程录制了一个讲解视频，该视频带有语音讲解，为零基础视频，比较详细；

“含演示”是指建模和仿真全过程录制了一个演示视频，该视频没有声音。

目录

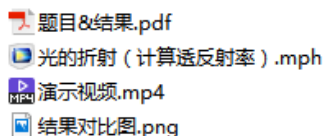
021 - COMSOL 光的折射（零基础教学型案例，含演示，35 元）	2
022 - FDTD 薄膜的透反射率（零基础教学型案例，含演示，35 元）	3
023 - COMSOL 薄膜的透反射率（零基础教学型案例，含演示，35 元）	4
024 - FDTD MIM 波导双微环谐振器（仅模型文件，30 元）	5
025 - COMSOL 周期性结构的吸收率（仅模型文件，30 元）	6
026 - FDTD 超表面折射率传感器（仅模型文件，90 元）	7
027 - COMSOL 石墨烯超表面 THz 吸收器（含演示，60 元）	11
028 - FDTD 超材料 Fano 共振（含演示，50 元）	13
029 - FDTD 用代码绘制圆角三角形结构（仅模型文件，15 元）	14
030 - Matlab 石墨烯的光学常数计算代码（Matlab 文件+参考文献，299 元）	15
031 - [自编软件]石墨烯的光学常数计算软件（exe 应用程序，免费试用版）	19
032 - Matlab VO ₂ 的光学常数计算代码（Matlab 文件+参考文献，189 元）	22
033 - [自编软件]VO ₂ 的光学常数计算软件（exe 应用程序，免费试用版）	27
034 - COMSOL 编写代码绘制几何：小球随机嵌在大球中（仅模型文件，30 元）	32
035 - COMSOL 编写代码绘制几何：小球密排在大球表面（仅模型文件，30 元）	36
036 - FDTD 纳米线的光散射（仅模型文件，免费）	40
037 - COMSOL 纳米线的光散射（仅模型文件，免费）	41
038 - FDTD MIM 波导电磁感应透明（含演示，50 元）	42
039 - COMSOL 三层薄膜的反射率（含讲解，50 元）	44
040 - COMSOL 等离激元超透镜（含演示，75 元）	45

021 - COMSOL 光的折射（零基础教学型案例，含演示，35 元）

基本介绍：

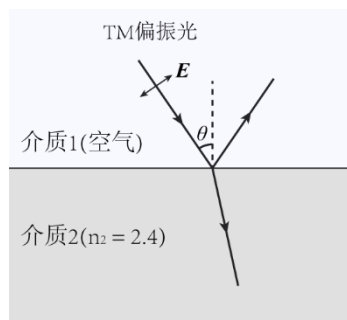
- 主要内容：用 COMSOL 做了光在两种介质分界面上的折射，将模拟得到的反射率、透射率与理论结果比较，验证了折射定律（Snell 定律）；
- 基于 COMSOL 频域求解，使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：端口、周期性边界条件 等；
- 绘制了：透反射率随入射角的关系图；
- 建模过程录制了时长为 7 min 的演示视频（没有声音）。

包含的文件截图：



详细描述：

题目：如右图所示，考虑光在平面边界上的反射和折射。入射光是线偏振光，电场 E 在入射平面内偏振（TM 偏振）。介质 1 是空气 ($n_1=1$)，介质 2 的折射率 n_2 是 2.4。假设入射光波长为 500 nm，计算不同入射角 θ_i 下的透反射率。

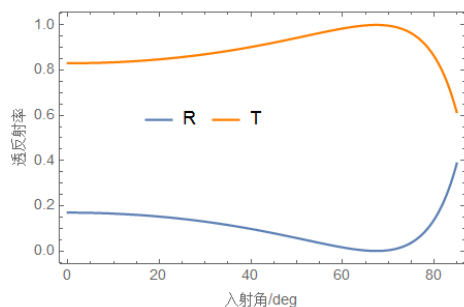


理论上的反射率和透射率可以用以下公式（菲涅尔公式）来解析计算，检查模拟结果是否符合理论值。

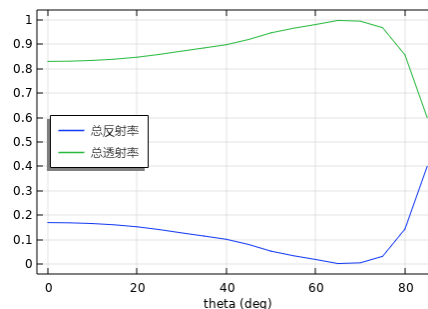
$$R_{\text{TM}} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad T_{\text{TM}} = \frac{4n_1 n_2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t)^2}$$

计算的内容和结果：

1、根据菲涅尔公式解析计算出来的透反射率随入射角的关系：



2、COMSOL 的计算结果：

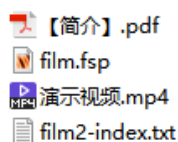


022 - FDTD 薄膜的透反射率（零基础教学型案例，含演示，35 元）

基本介绍：

- 主要内容：用 Lumerical 做了光正入射到薄膜时的透反射率；
- 基于 Lumerical FDTD Solution 求解，使用的软件版本为 Lumerical 2018a；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：自定义材料、平面光源、功率监视器、周期性边界 等；
- 绘制了：透反射率随波长的变化关系；
- 建模过程录制了时长为 8 min 的演示视频（没有声音）。

包含的文件截图：

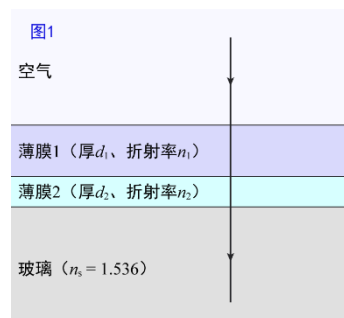


详细描述：

如右图所示，在玻璃上镀两层薄膜。

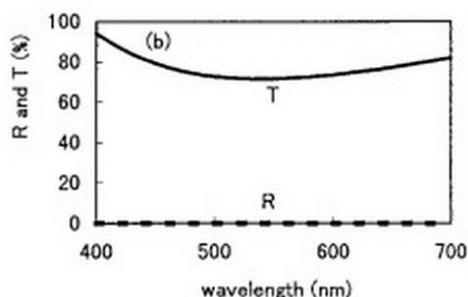
- 第一层薄膜的厚度 (d_1) 为 85 nm、折射率 (n_1) 为 1.46；
- 第二层薄膜的厚度 (d_2) 为 15 nm、复折射率 ($n_2 = n + ki$) 不是常数，而是一个与波长相关的函数；
- 玻璃的折射率 (n_s) 为 1.536。

波长为 400 ~ 700 nm 范围内的线偏振光垂直入射，发现反射率几乎为零，也就是说入射光除了被薄膜吸收一部分以外，几乎全透射了，所以这相当于是一个抗反射图层。

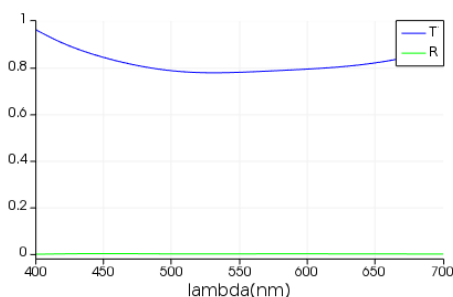


计算的内容和结果：

1、期望得到的结果（透反射率）：



2、本例计算出的结果（透反射率）：

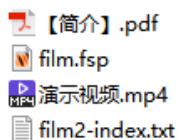


023 - COMSOL 薄膜的透反射率（零基础教学型案例，含演示，35 元）

基本介绍：

- 主要内容：用 COMSOL 做了光正入射到薄膜时的透反射率；
- 基于 COMSOL 频域求解，使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：自定义材料、端口、周期性边界 等；
- 绘制了：透反射率随波长的变化关系；
- 建模过程录制了时长为 10 min 的演示视频（没有声音）。

包含的文件截图：

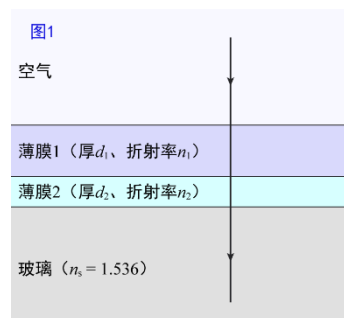


详细描述：

如右图所示，在玻璃上镀两层薄膜。

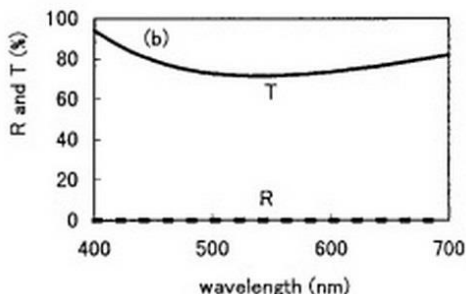
- 第一层薄膜的厚度 (d_1) 为 85 nm、折射率 (n_1) 为 1.46；
- 第二层薄膜的厚度 (d_2) 为 15 nm、复折射率 ($n_2 = n + ki$) 不是常数，而是一个与波长相关的函数；
- 玻璃的折射率 (n_s) 为 1.536。

波长为 400 ~ 700 nm 范围内的线偏振光垂直入射，发现反射率几乎为零，也就是说入射光除了被薄膜吸收一部分以外，几乎全透射了，所以这相当于是一个抗反射图层。

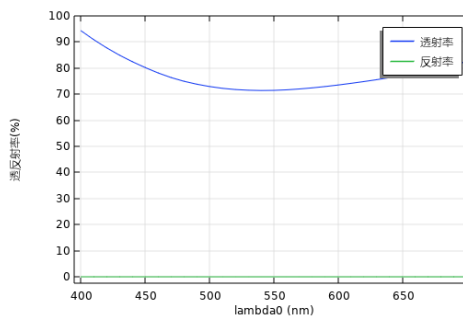


计算的内容和结果：

1、期望得到的结果（透反射率）：



2、本例计算出的结果（透反射率）：

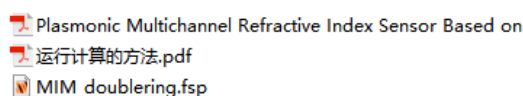


024 – FDTD MIM 波导双微环谐振器（仅模型文件，30 元）

基本介绍：

- 主要内容：根据发表在 *Sensors* 上的论文《Plasmonic Multichannel Refractive Index Sensor Based on Subwavelength Tangent-Ring Metal–Insulator–Metal Waveguide, 作者: Zicong Guo 等》，用 Lumerical FDTD 重复了其中的 Fig.2(b-d)、Fig.3(a) ；
- 基于 Lumerical FDTD Solution 求解，使用的软件版本为 Lumerical 2016a；
- 计算所需的内存：1 GB；
- 涉及的内容：2D-FDTD、MIM 波导中平面光源的使用、场监视器、透射率监视器 等；
- 绘制了：透射率随波长的变化关系、磁场分布、输出光的相位响应；
- 本案例仅包含模型文件，但有一个如何运行仿真的简单说明。

包含的文件截图：

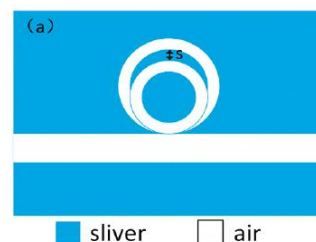


详细描述：

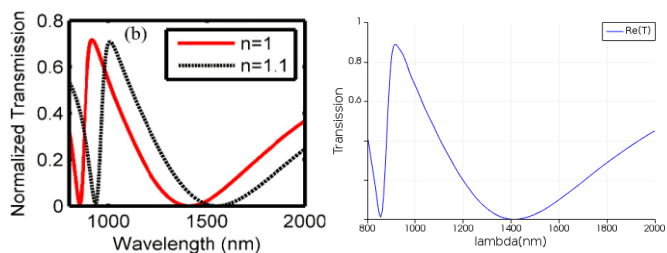
如右图所示，在直通道“金属-介质-金属”（MIM）波导旁边放置两个微环。

直通道的宽度为 50 nm，微环的宽度为 20 nm，两个微环的内径分别为 40 nm 和 60 nm。

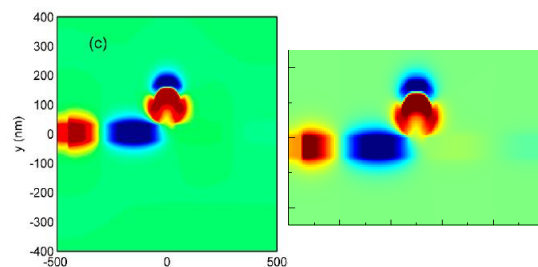
研究波导中的光经过微环后的透射率和相位变化。



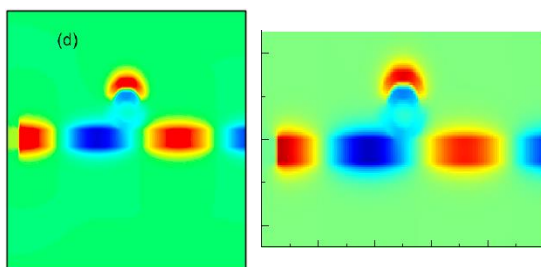
计算的内容和结果：



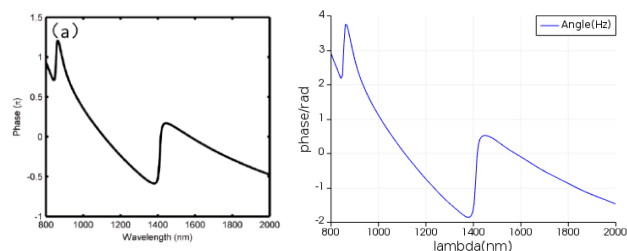
透射率。左：文献中的图，右：本案例的结果
（重复的是左图的红色线）



波长 854 nm 处的磁场 H_z
左：文献中的图，右：本案例的结果



波长 920 nm 处的磁场 H_z
左：文献中的图，右：本案例的结果



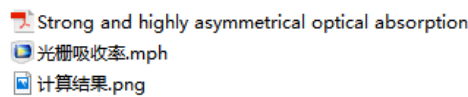
输出光的相位随波长的关系
左：文献中的图，右：本案例的结果

025 – COMSOL 周期性结构的吸收率（仅模型文件，30 元）

基本介绍：

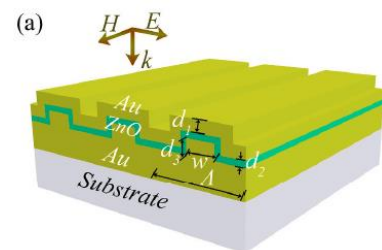
- 主要内容：根据发表在 *Scientific Reports* 上的论文《Strong and highly asymmetrical optical absorption in conformal metal-semiconductor-metal grating system for plasmonic hot-electron photodetection application》，作者：Kai Wu 等》，用 COMSOL 重复了其中的 Fig.3(1)、Fig.4(b)、Fig.4(d)、Fig.4(f)；
- 基于 COMSOL 频域求解，使用的软件版本为 COMSOL 5.3 (5.3.0.223)；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：全局参数、组件耦合-积分、变量、自定义材料、端口、周期性条件、自定义网格、对波长的扫描 等；
- 绘制了：上层金属和下层金属的吸收率、吸收功率密度分布；
- 本案例仅包含模型文件。

包含的文件截图：



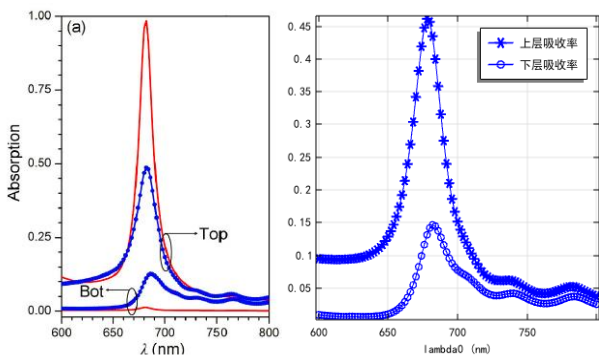
详细描述：

如上图所示，由 Au/ZnO/Au 三层材料构成的光栅放置在 SiO₂ 衬底上。图中 $\Lambda = 600 \text{ nm}$ 、 $d_1 = 60 \text{ nm}$ 、 $d_2 = 4 \text{ nm}$ 、 $d_3 = 40 \text{ nm}$ 、 $w = 400 \text{ nm}$ 。在波长为 $600 \sim 800 \text{ nm}$ 的 TM 光照射下，计算上下两层金对入射光的吸收率。



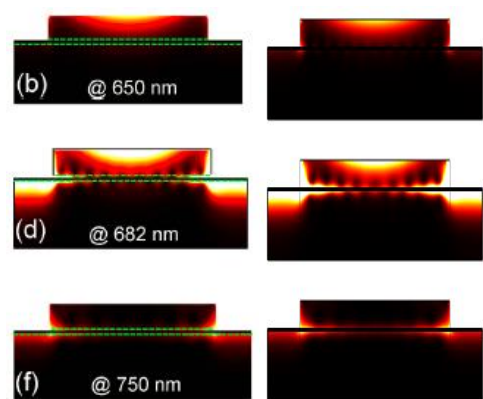
对特定区域计算吸收率需要在软件中对该区域内的吸收功率密度（单位 W/m^3 ）进行积分，得到该区域的吸收功率（单位 W ），然后除以入射光功率得到吸收率。

计算的内容和结果：



上层和下层金中的吸收率。

左：文献中的图，右：本案例的结果
（重复的是左图的蓝色线）



三个不同波长的光吸收功率密度分布
左：文献中的图，右：本案例的结果

026 – FDTD 超表面折射率传感器（仅模型文件，90 元）

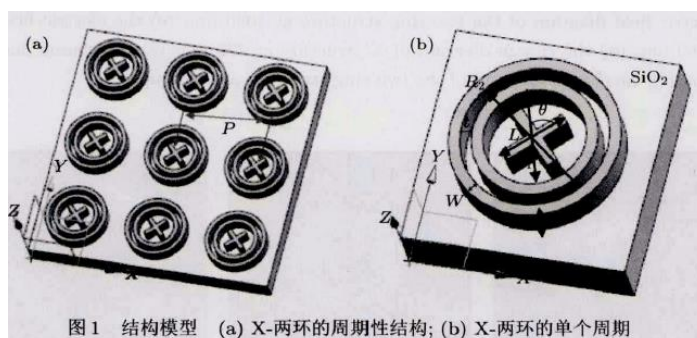
基本介绍：

- 主要内容：根据发表在 *物理学报* 上的论文《X-两环结构的光学特性研究，作者：潘庭婷等》，用 Lumerical FDTD 重复了其中的所有内容（共 24 张图）；
- 基于 Lumerical FDTD Solution 求解，使用的软件版本为 Lumerical 2018a；
- 计算所需的内存：2 GB；
- 涉及的内容：在 Structure group 中自己编写脚本构建复杂结构、自定义网格、透射率监视器、在 Analysis 分析组中自己编写脚本计算 2D 电荷分布、参数扫描、在 Script Editor 中自己编写脚本画组合图等；
- 绘制了：不同结构参数的透射率、不同结构参数的电场分布、电荷分布、当该结构用作传感器时的灵敏度（共 24 张图）；
- 本案例仅包含模型文件，但有一个如何运行的简单说明。

包含的文件截图：



详细描述：



如上图所示，由 Au 材料制成的超表面放置在 SiO_2 衬底上。图中，外环内直径 $R_2=$

如需购买案例请到作者个人主页: <http://opt-simul.com/>

备用主页: https://mbd.pub/o/opt_simul/work

淘宝店铺: <https://shop511834854.taobao.com/>

检查更新
Check for Update

260 nm、内环内直径 $R_1=180$ nm、X 的臂长 $L=120$ nm、角度 $\theta=90^\circ$ ，内外环及 X 的宽度均为 20 nm、厚度 H 均为 60 nm、两环之间的距离 = 20 nm，周期 $P=400$ nm。

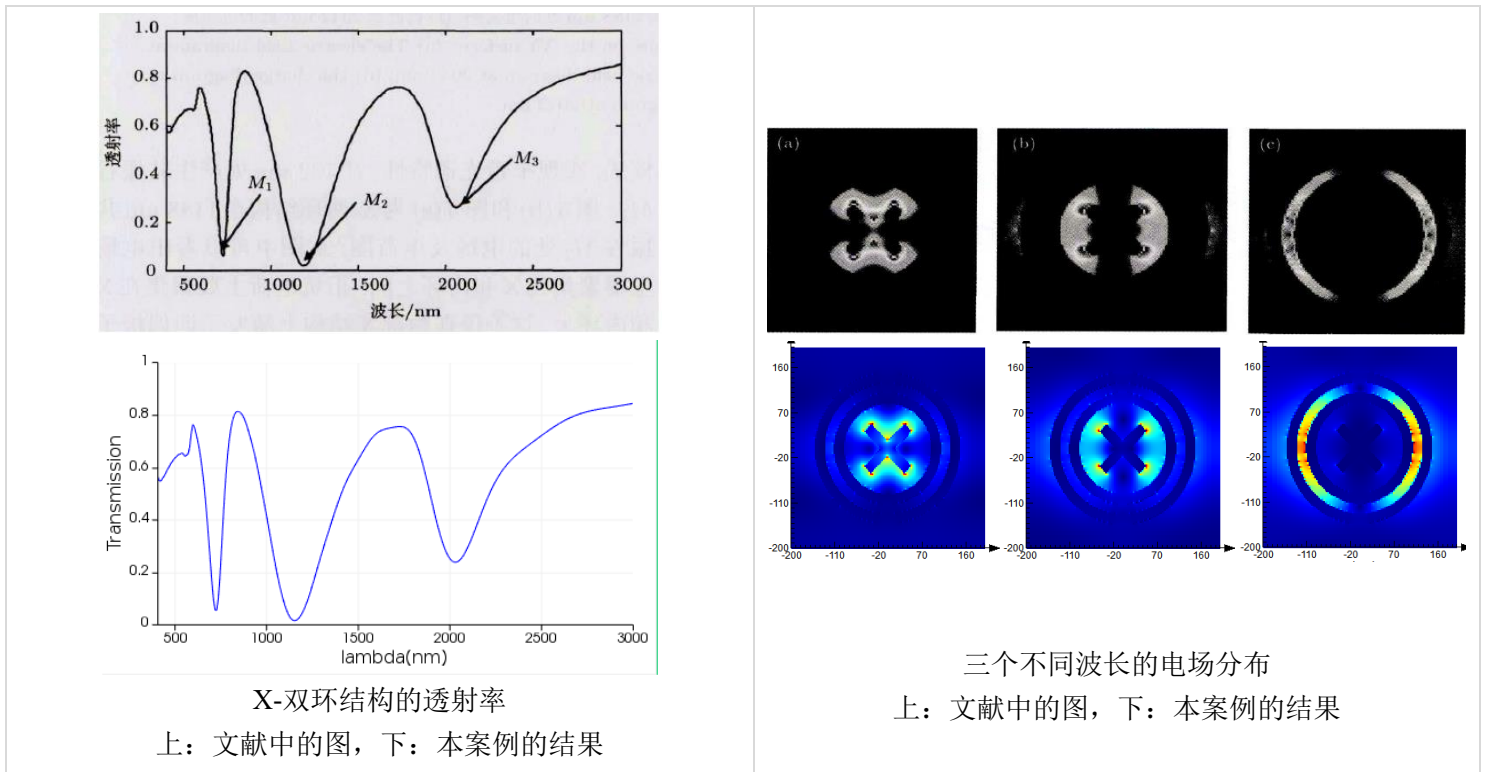
本文模拟过程中采用 Drude 模型，可以表示为：

$$\epsilon_{\text{Au}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$$

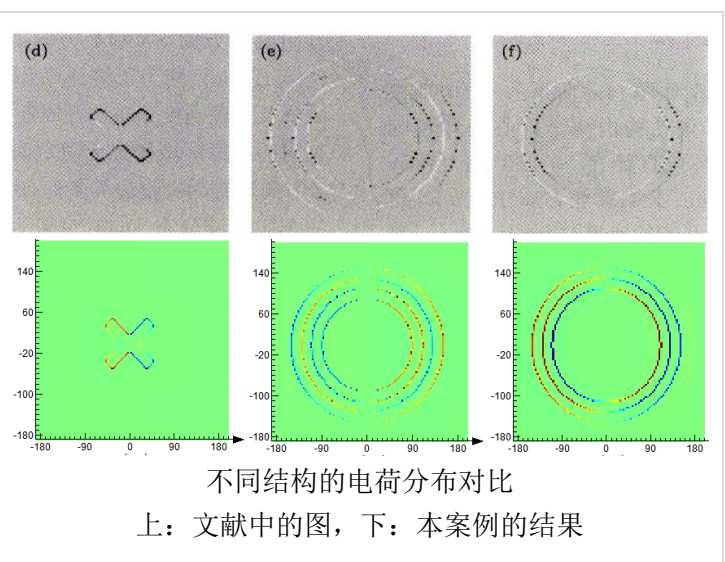
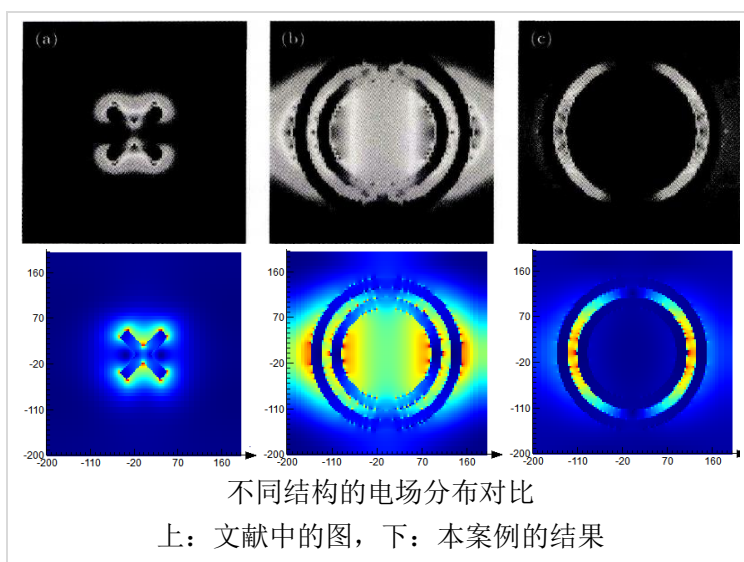
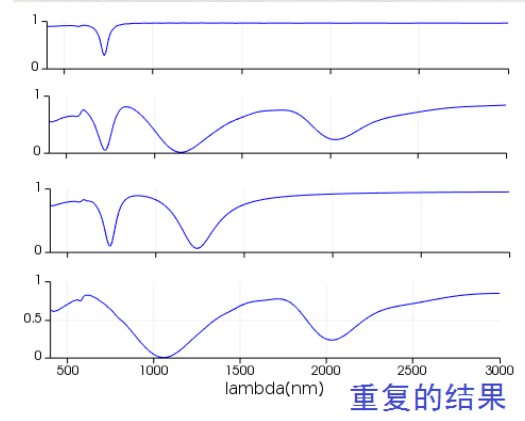
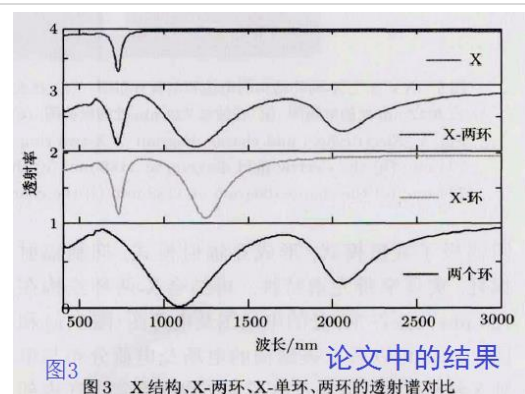
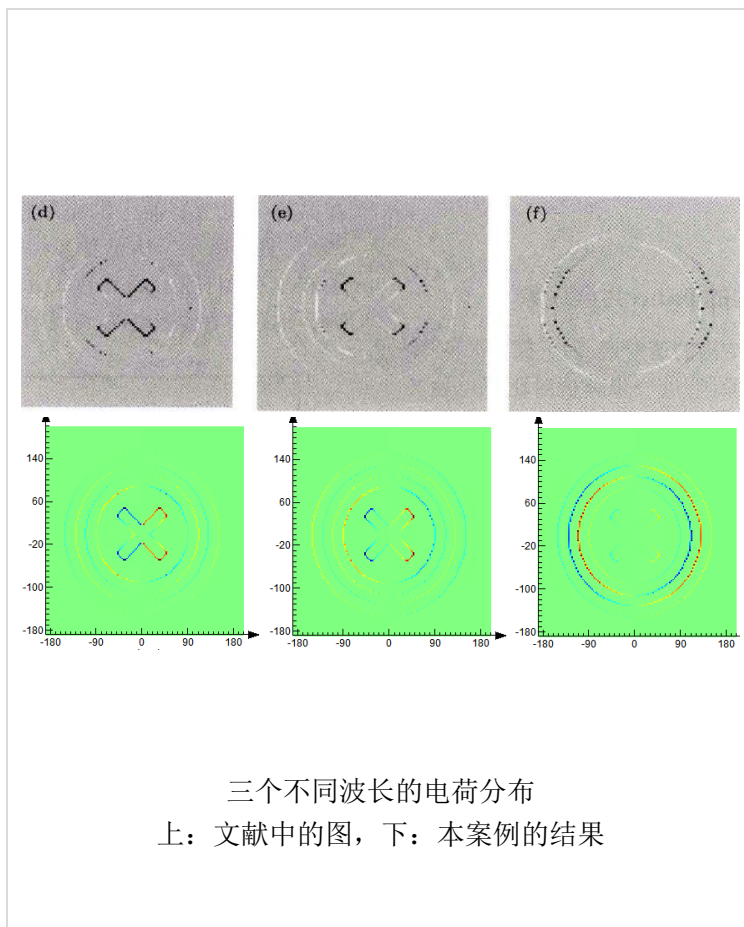
利用 FDTD 方法建立模型，采用波长范围为 400~3000 nm 的平面波，沿 z 方向向下垂直入射金属表面，偏振方向沿 x 方向。 x 和 y 方向上设置成周期边界条件(periodic)， z 方向设置为吸收边界条件(PML)。

为了进一步分析 X 一两环结构的共振特性，针对相关模型参数：X 的臂长、内外环的距离 t ，内外环宽度、周期 P 、环数、X 所呈的角度及环境折射率的改变进行仿真对比，得到了明显的光学响应规律，为实现共振谷波长的可调控提供了有效途径。

计算的内容和结果：



(转下页)



(转下页)

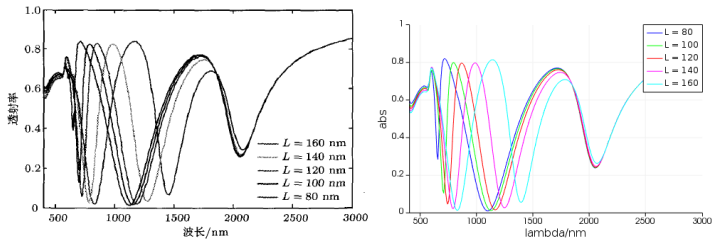


图6 在不同的X长度下X-两环结构的透射谱

不同棒长度的透射率对比
左: 文献中的图, 右: 本案例的结果

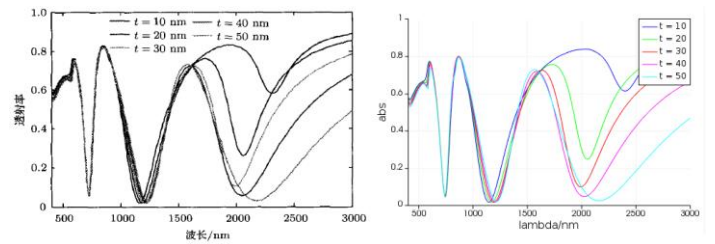


图7 在不同的环间距下X-两环结构的透射谱

不同环间距的透射率对比
左: 文献中的图, 右: 本案例的结果

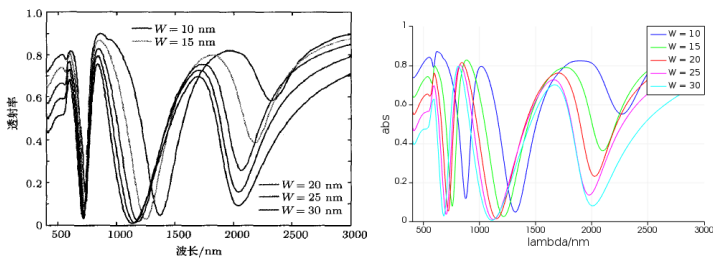


图8 X-两环结构在不同结构宽度下的透射谱

不同结构宽度的透射率对比
左: 文献中的图, 右: 本案例的结果

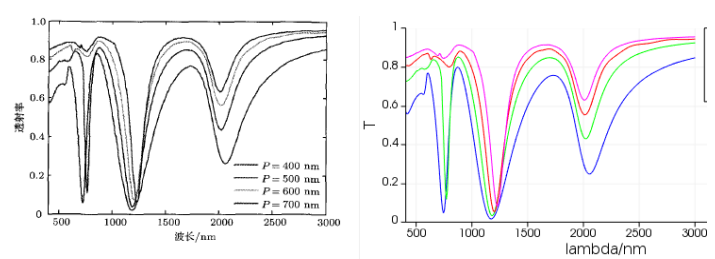


图9 X-两环结构在不同结构周期下的透射谱

不同结构周期的透射率对比
左: 文献中的图, 右: 本案例的结果

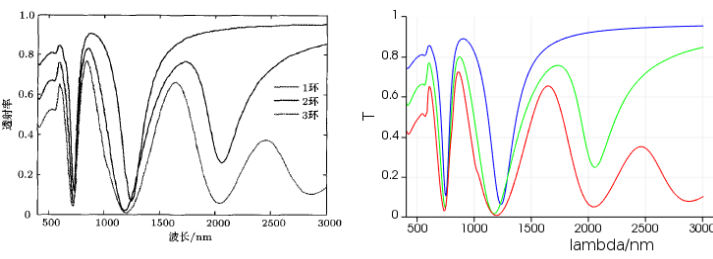


图10 X-环、X-两环、X-三环结构的透射谱

不同环数量的透射率对比
左: 文献中的图, 右: 本案例的结果

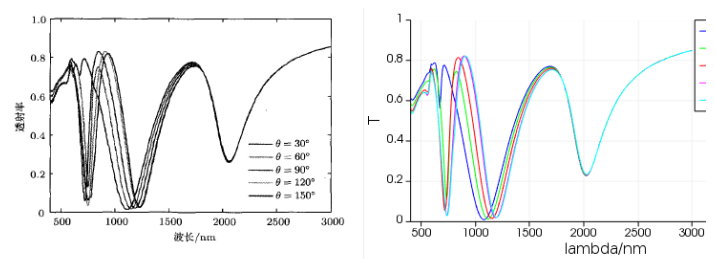


图11 当X所呈角度增加时X-两环结构的透射谱的变化

中间“X”结构不同角度的透射率对比
左: 文献中的图, 右: 本案例的结果

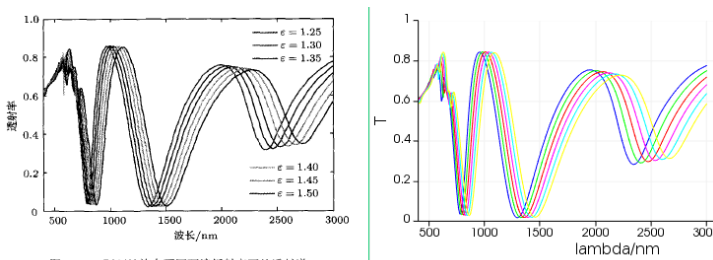


图12 X-两环结构在不同环境折射率下的透射谱

不同环境折射率的电场分布对比
上: 文献中的图, 下: 本案例的结果

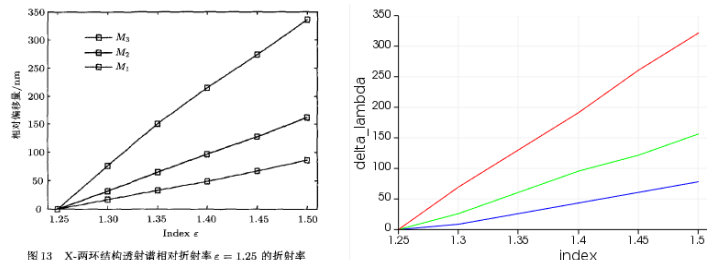


图13 X-两环结构透射谱相对折射率 epsilon = 1.25 的折射率灵敏度曲线

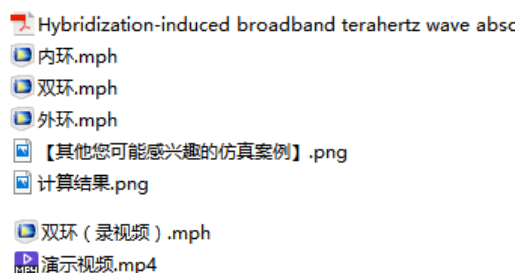
不同环境折射率时的灵敏度曲线对比
上: 文献中的图, 下: 本案例的结果

027 – COMSOL 石墨烯超表面 THz 吸收器（含演示，60 元）

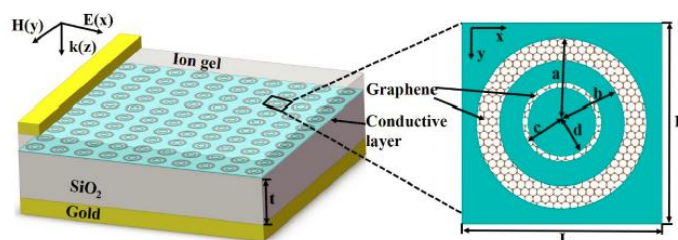
基本介绍：

- 主要内容：根据发表在 *Optics Express* 上的论文《Hybridization-induced broadband terahertz wave absorption with graphene metasurfaces》，作者：Nanli Mou 等》，用 COMSOL 重复了其中的 Fig.2、Fig.3 ；
- 基于 COMSOL 频域求解，使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：8 GB；
- 涉及的内容：全局参数、二维材料-石墨烯、过渡边界条件、端口、周期性条件、自定义网格、对波长的扫描、对数据集的操作（绘制三维结构内部切面上的场）等；
- 绘制了：吸收率曲线、用二维绘图组绘制三维结构内部切面上的场；
- 建模过程录制了时长为 22 min 的演示视频（没有声音）。

包含的文件截图：



详细描述：



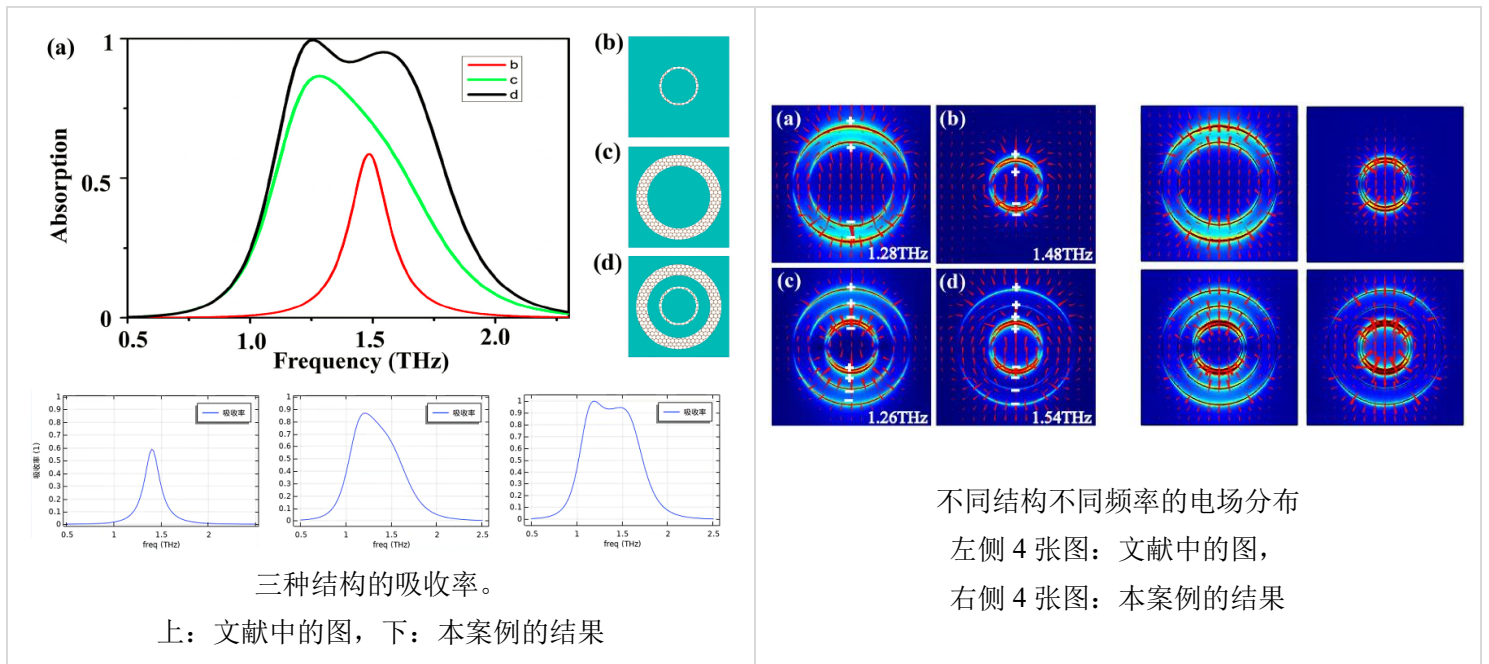
如上图所示，基本结构是 Au/SiO₂ 衬底上的同心环形石墨烯超表面。 $a = 5.5 \mu\text{m}$, $b = 4 \mu\text{m}$, $c = 2.5 \mu\text{m}$, $d = 2.2 \mu\text{m}$, $t = 28 \mu\text{m}$, $L = 15 \mu\text{m}$ 。

石墨烯是一种二维材料，厚度仅有一个原子。石墨烯的电导率一般用 Kubo 公式描述，在本文中，由于研究的波段是 THz，所以可以将石墨烯的电导率近似为 Drude 模型。

本案例演示了如何在 comsol 中创建二维材料，计算了频率为 0.5~2.5 THz 的入射光下该超表面的吸收率和电场分布。

计算的内容和结果：

（转下页）

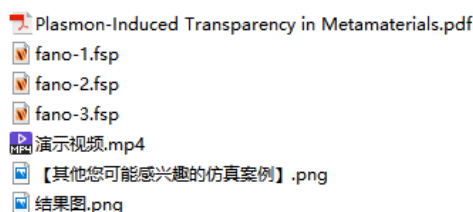


028 – FDTD 超材料 Fano 共振（含演示，50 元）

基本介绍：

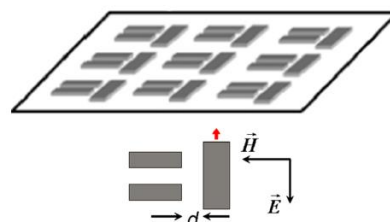
- 主要内容：根据发表在 *Physical Review Letters* 上的论文《Plasmon-Induced Transparency in Metamaterials》，作者：Shuang Zhang 等》，用 Lumerical 重复了其中的 Fig.2b、Fig.2c ；
- 基于 Lumerical FDTD Solution 求解，使用的软件版本为 Lumerical 2018a；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：在 structure group 中编写脚本画几何结构、TFSF 光源、反对称边界条件、自定义网格、点监视器等；
- 绘制了：Fano 共振曲线、电场分布；
- 建模过程录制了时长为 20 min 的演示视频（没有声音）。

包含的文件截图：



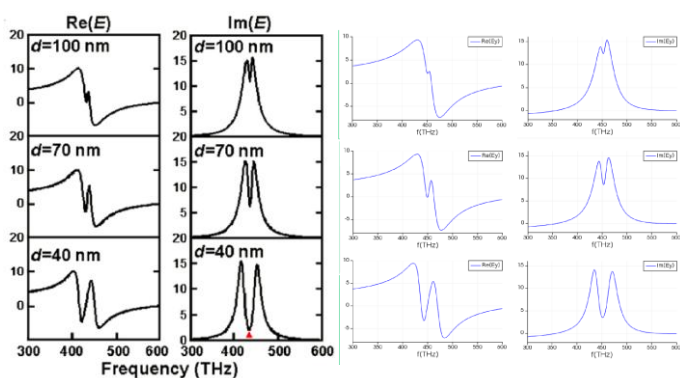
详细描述：

如上图所示，超表面的基本单元由三个 Ag 纳米棒组成。右侧纳米棒的长宽分别为 128 nm 和 50 nm；左侧两个纳米棒的长宽分别为 100 nm 和 30 nm；左侧两个纳米棒的间距为 30 nm；纳米棒的厚度均为 20 nm；图中 $d = 40 \sim 100$ nm。图中的红色箭头是电场探针。



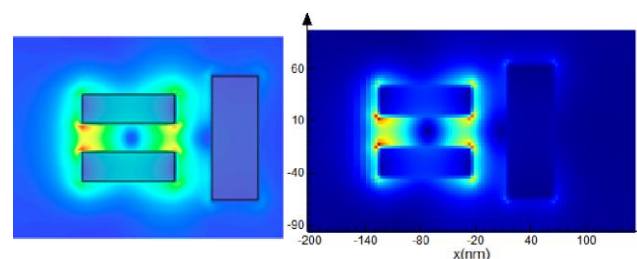
在波长为 300 ~ 600 nm 的平面光正入射下，不同的 d 对应不同的法诺线形。

计算的内容和结果：



Fano 共振曲线

左：文献中的图，右：本案例的结果



共振峰处的电场分布

左：文献中的图，右：本案例的结果

如需购买案例请到作者个人主页：<http://opt-simul.com/>

备用主页：https://mbd.pub/o/opt_simul/work

淘宝店铺：<https://shop511834854.taobao.com/>

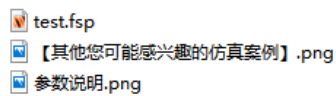
检查更新
Check for Update

029 – FDTD 用代码绘制圆角三角形结构（仅模型文件，15 元）

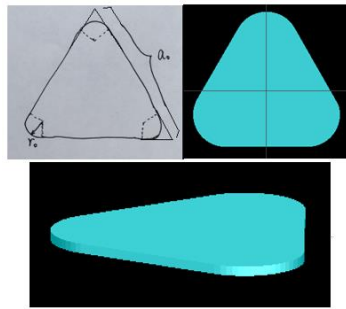
基本介绍：

- 主要内容：在 structure group 中用脚本画了一个圆角三角形结构；
- 基于 Lumerical FDTD Solution，使用的软件版本为 Lumerical 2018a；
- 计算所需的内存：无；
- 涉及的内容：在 structure group 中编写脚本画一个圆角三角形结构；
- 本案例仅包含模型文件。

包含的文件截图：

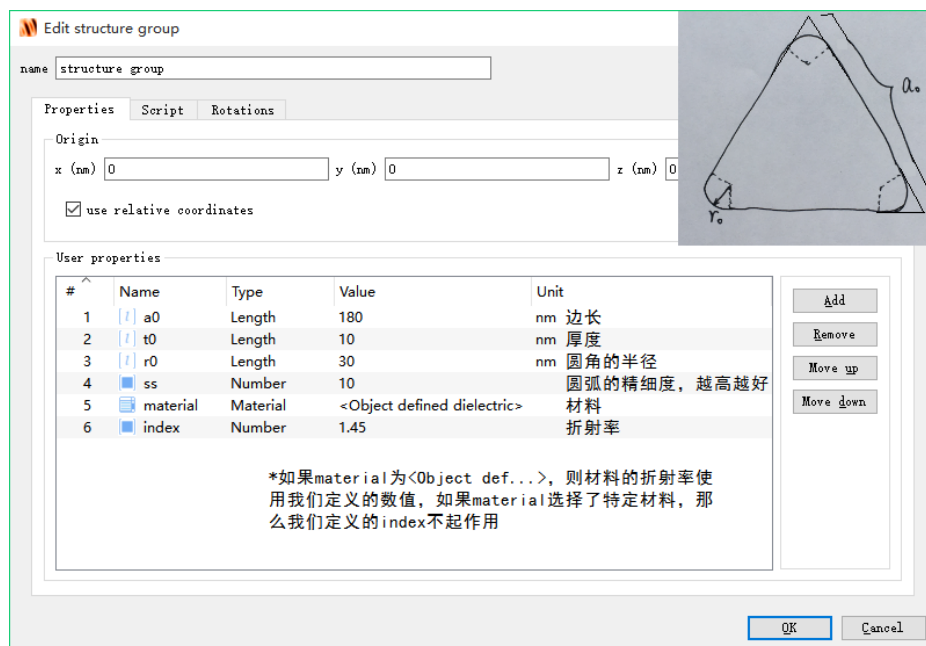


详细描述：



如上图所示，该结构是一个圆角的三角形柱体。三角形的边长为 a_0 、三个角的圆角半径为 r_0 。

在结构组里可以方便地改动这种圆角三角形的参数，如下图所示。



030 – Matlab 石墨烯的光学常数计算代码（Matlab 文件+参考文献，299 元）

基本介绍：

- 主要内容：基于 Matlab 编写了 Kubo 公式及其 4 种近似公式的计算代码；
- 计算所需的内存：无；
- 本案例包含 Matlab 程序文件和参考文献。

包含的文件截图：

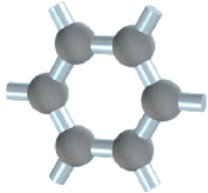


详细描述：

石墨烯（Graphene）由于其优异的可调谐性能，是近几年的热门研究对象。在您的研究中加入石墨烯调谐，有望显著提升论文档次。

计算石墨烯光学常数（电导率、介电常数、折射率）的 Kubo 公式比较复杂，正确计算该公式耗时耗力。

计算石墨烯 (Graphene)
电导率的 Kubo 公式：



$$\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{-ie^2}{\pi\hbar^2(\omega + 2i\Gamma)} \int_0^\infty \xi \left[\frac{\partial f_d(\xi)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi)}{\partial \xi} \right] d\xi$$

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{ie^2(\omega + 2i\Gamma)}{\pi\hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_d(-\xi) - f_d(\xi)}{(\omega + 2i\Gamma)^2 - 4(\xi/\hbar)^2} d\xi$$

$$f_d(\xi) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\xi - \mu_c}{k_B T}\right) + 1}$$

是费米狄拉克分布

为此，本案例基于 Matlab 软件编写了石墨烯光学常数的 5 种常用公式的计算程序，这 5 种公式分别为：

- Kubo 公式
- Hanson 提出的近似公式
- Falkovsky 提出的第一种近似公式
- Falkovsky 提出的第二种近似公式
- Drude 模型近似公式

这 5 种公式分别写成 Matlab 的函数，可以方便地调用。以 Kubo 公式为例，程序截图如

下, 注释中详细介绍了每个参数的含义及参考文献列表:

```
function [sigma, epsilon, index] = Graphene_Kubo(freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g)

% *** 本函数基于Kubo公式 *****
% *** 输入参数说明: *****
% freq - 频率, 单位[THz]
% mu_c - 化学势, 单位[eV], 取值范围为 -3[eV]~3[eV]
% Gamma - 散射率, 单位[meV]
% T - 温度, 单位[K], 取值范围为 100[K]~3000[K]
% t_g - 单层石墨烯厚度, 单位[nm]
% N_g - 石墨烯层数
% *****
% *** 输出参数说明: *****
% sigma - 面内电导率, 单位为[S]
% epsilon - 相对介电常数
% index - 折射率
% *****
% *** 参考文献: *****
% [1] Eq. 13 in "V. P. Gusynin, S. S. Mironov and J. P. Carbotto, Phys. Rev. B 78, 155424 (2008)."
% [2] Eq. 5.11 in "V. P. Gusynin, S. S. Mironov and J. P. Carbotto, Phys. Rev. B 78, 155424 (2008)."
% [3] Eq. 8 in "L. A. Falkovsky and G. A. Fal'ko, Phys. Rev. B 73, 041402 (2006)."
% [4] Eq. 1 in "L. A. Falkovsky and G. A. Fal'ko, Phys. Rev. B 73, 041402 (2006)."
% [5] Eq. 1 in "L. A. Falkovsky, Journal of Applied Physics 104, 043708 (2008)."
% [6] Eq. 1 in "G. W. Hanson, J. Appl. Phys. 97, 104310 (2005)."
% *****
```

本案例还给出了两个例子, 分别名为“example1.m”和“example2.m”(见前面的文件目录截图), 以展示这 5 个函数的用法。

- “example1.m”对比了这 5 种公式在 THz 波段的计算结果, 结果表明 5 种公式计算结果完全相同;
- “example2.m”利用 Hanson 的公式计算了石墨烯在 3 ~ 8 THz 范围内不同化学势的介电常数, 并与论文《A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial》对比, 计算结果与论文中的图完全一致。

两个例子的代码截图和结果图转到下页中展示。

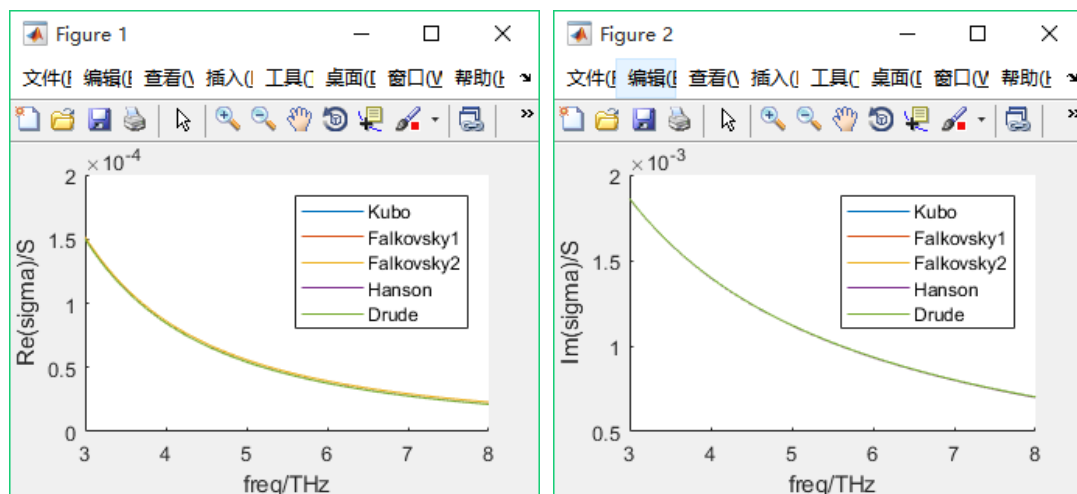
(转下页)

example1.m 的代码:

```

example1.m x +
1 -   freq = 3:0.05:8; % 频率 (THz)
2 -   mu_c = 0.3;     % 化学势 (eV)
3 -   Gamma = 0.5;   % 散射率 (meV)
4 -   T = 300;       % 温度 (K)
5 -   t_g = 0.335;   % 单层石墨烯厚 (nm)
6 -   N_g = 1;       % 石墨烯层数
7
8   % 下面是 5 种不同的公式计算石墨烯的电导率、介电常数、折射率
9 -   [sigma1, epsilon1, index1] = Graphene_Kubo( freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g );
10 -  [sigma2, epsilon2, index2] = Graphene_Falkovsky1( freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g );
11 -  [sigma3, epsilon3, index3] = Graphene_Falkovsky2( freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g );
12 -  [sigma4, epsilon4, index4] = Graphene_Hanson( freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g );
13 -  [sigma5, epsilon5, index5] = Graphene_Drude( freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g );
14
15  % 画图:
16 -  figure; hold on;
17 -  plot(freq, real(sigma1));
18 -  plot(freq, real(sigma2));
19 -  plot(freq, real(sigma3));
20 -  plot(freq, real(sigma4));
21 -  plot(freq, real(sigma5));
22 -  legend(["Kubo", "Falkovsky1", "Falkovsky2", "Hanson", "Drude"]);
23
24 -  figure; hold on;
25 -  plot(freq, imag(sigma1));
26 -  plot(freq, imag(sigma2));
27 -  plot(freq, imag(sigma3));
28 -  plot(freq, imag(sigma4));
29 -  plot(freq, imag(sigma5));
30 -  legend(["Kubo", "Falkovsky1", "Falkovsky2", "Hanson", "Drude"]);
31
    
```

example1.m 绘制的结果:



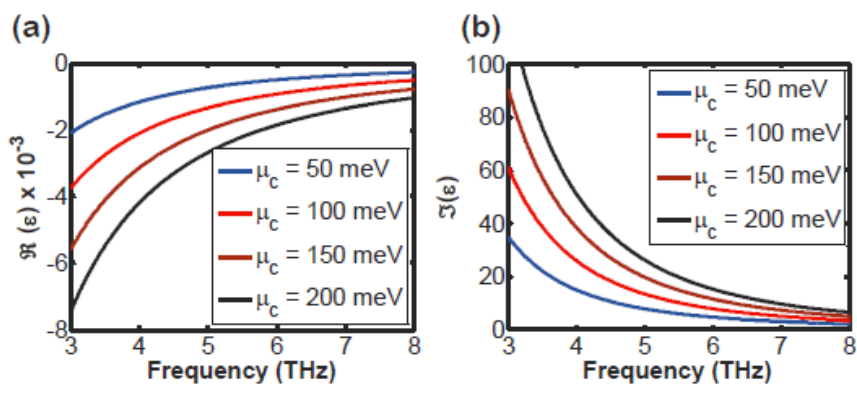
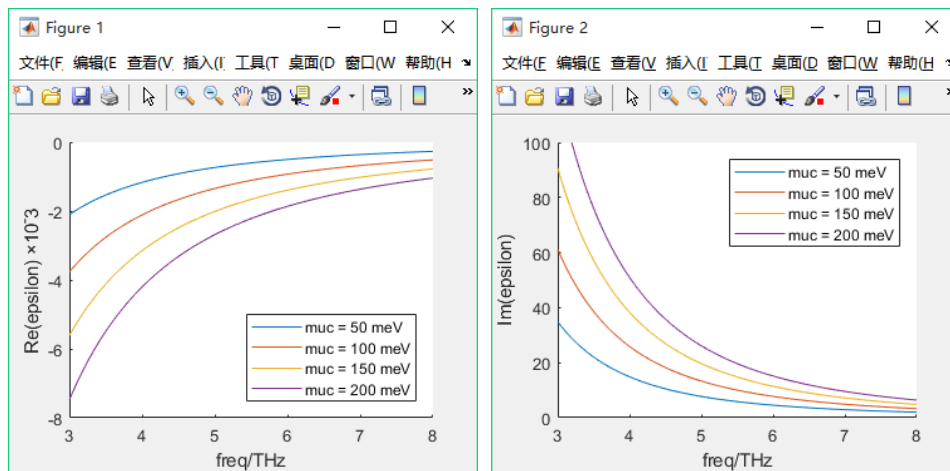
(转下页)

example2.m 的代码:

```

1  freq = 3:0.05:8; % 频率 (THz)
2  %mu_c = 0.05; % 化学势 (eV)
3  Gamma = 0.1; % 散射率 (meV)
4  T = 300; % 温度 (K)
5  t_g = 1; % 单层石墨烯厚 (nm)
6  N_g = 1; % 石墨烯层数
7
8  figure; hold on;
9  for mu_c = 0.05:0.05:0.2
10     [sigma, epsilon, index] = Graphene_Hanson(freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g);
11     plot(freq, real(epsilon)*1e-3);
12 end
13 legend(["muc = 50 meV", "muc = 100 meV", "muc = 150 meV", "muc = 200 meV"], ...
14         'location', 'southeast');
15 xlabel("freq/THz"); ylabel("Re(epsilon) × 10-3");
16
17 figure; hold on;
18 for mu_c = 0.05:0.05:0.2
19     [sigma, epsilon, index] = Graphene_Hanson(freq, mu_c, Gamma, T, t_g, N_g);
20     plot(freq, imag(epsilon));
21 end
22 legend(["muc = 50 meV", "muc = 100 meV", "muc = 150 meV", "muc = 200 meV"]);
23 xlabel("freq/THz"); ylabel("Im(epsilon)");
24 axis([-inf inf 0 100]);
    
```

example2.m 绘制的结果 (与论文中的图对比):

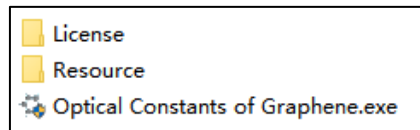


031 – [自编软件]石墨烯的光学常数计算软件 (exe 应用程序, 免费试用版)

基本介绍:

- 主要内容: 本店自主开发的 Kubo 公式及其 4 种近似公式的计算软件, windows 平台 exe 应用程序;
- 计算所需的内存: 无;
- 本案例包含一个本店自主开发的软件。

包含的文件截图:

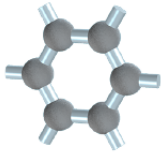


详细描述:

石墨烯 (Graphene) 由于其优异的可调谐性能, 是近几年的热门研究对象。在您的研究中加入石墨烯调谐, 有望显著提升论文档次。

计算石墨烯光学常数 (电导率、介电常数、折射率) 的 Kubo 公式比较复杂, 正确计算该公式耗时耗力。

计算石墨烯 (Graphene)
电导率的 Kubo 公式:



$$\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{-ie^2}{\pi\hbar^2(\omega + 2i\Gamma)} \int_0^\infty \xi \left[\frac{\partial f_d(\xi)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi)}{\partial \xi} \right] d\xi$$

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{ie^2(\omega + 2i\Gamma)}{\pi\hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_d(-\xi) - f_d(\xi)}{(\omega + 2i\Gamma)^2 - 4(\xi/\hbar)^2} d\xi$$

$$f_d(\xi) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\xi - \mu_c}{k_B T}\right) + 1}$$

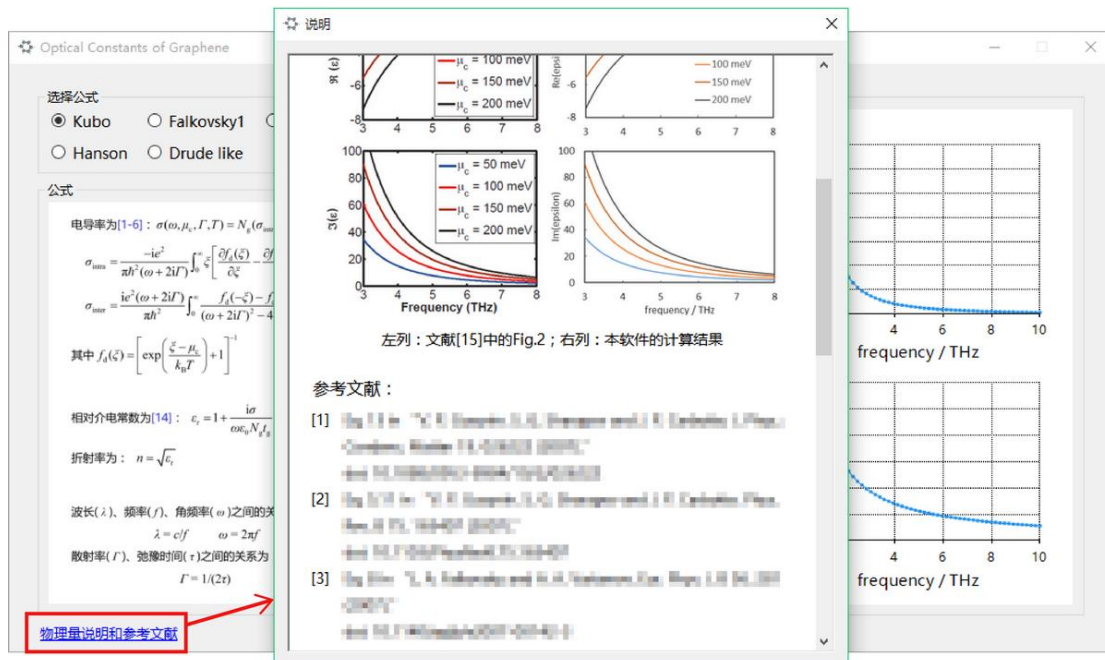
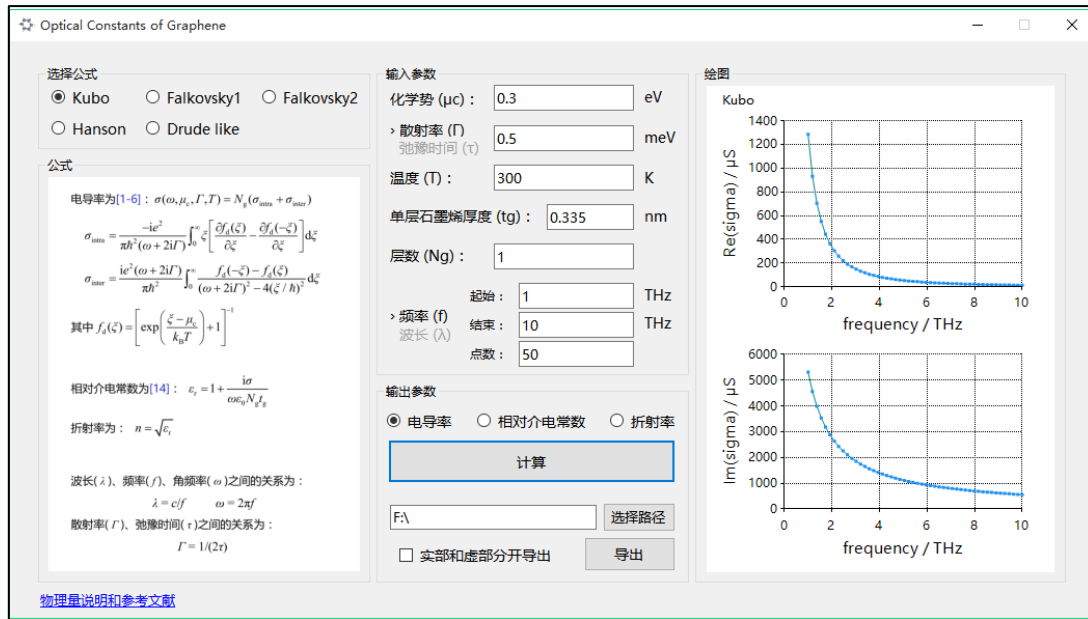
是费米狄拉克分布

为此, 本店自主开发了 Kubo 公式及其 4 种近似公式的计算软件, 是一个独立的 exe 应用程序, 可在 windows 平台运行。这 5 种公式分别为:

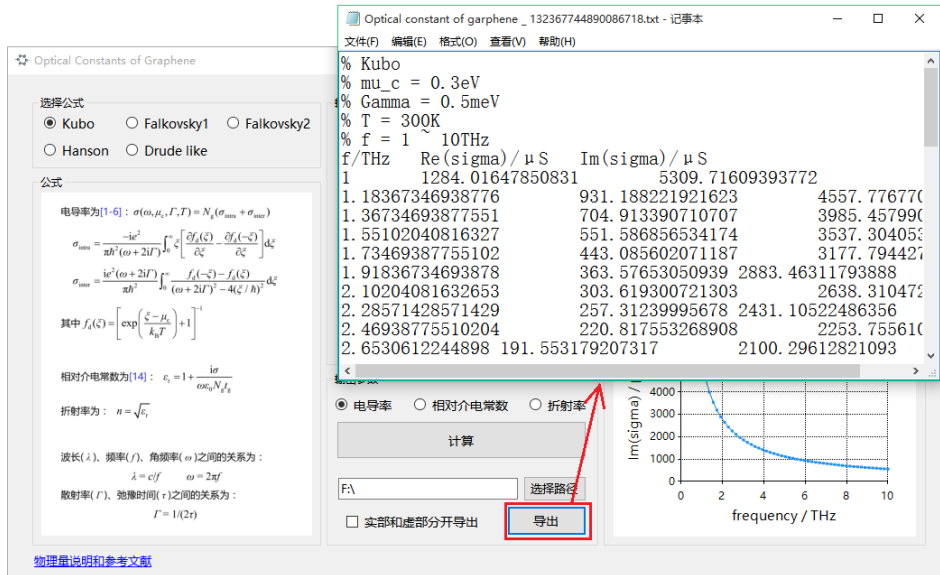
- Kubo 公式
- Hanson 提出的近似公式
- Falkovsky 提出的第一种近似公式
- Falkovsky 提出的第二种近似公式
- Drude 模型近似公式

(转下页)

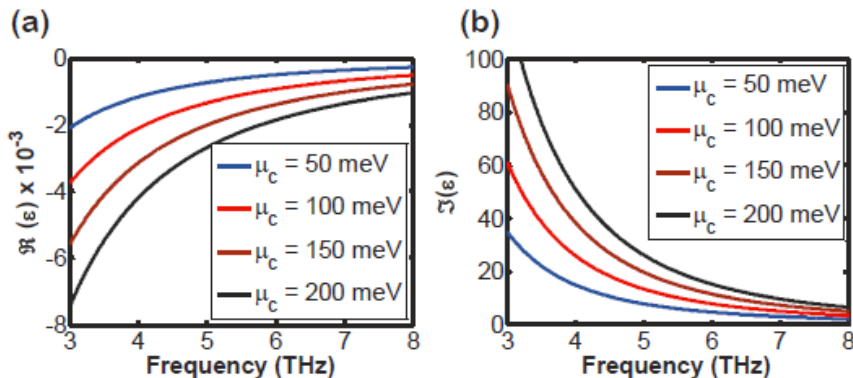
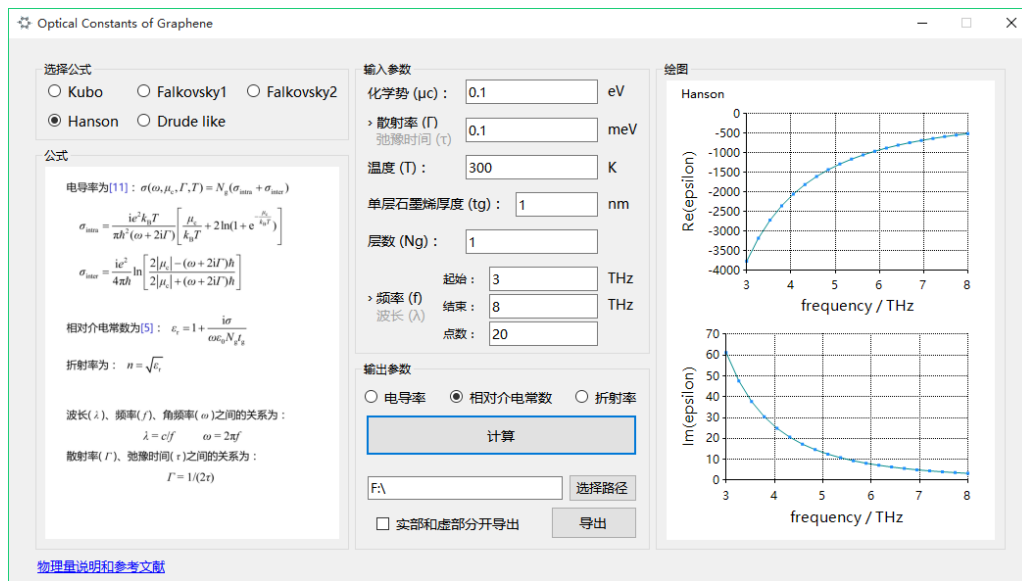
软件界面:



(转下页)



利用 Hanson 的公式计算了石墨烯在 3 ~ 8 THz 范围内不同化学势的介电常数, 并与论文《A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial》对比, 计算结果与论文中的图完全一致:



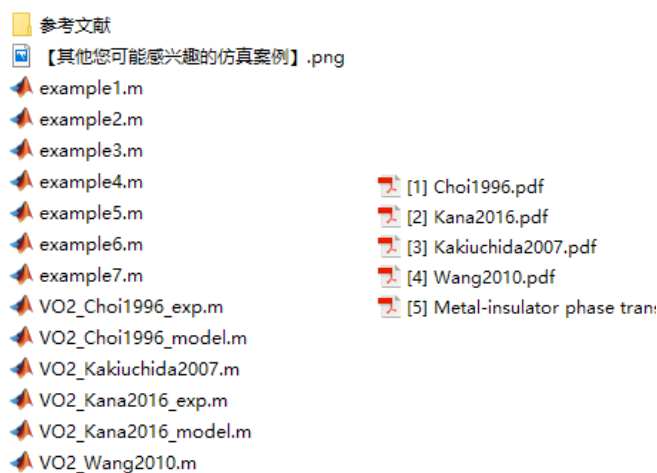
软件截图中计算的是论文中的红色线

032 – Matlab VO₂ 的光学常数计算代码 (Matlab 文件+参考文献, 189 元)

基本介绍:

- 主要内容: 参考四篇 SCI 论文, 基于 Matlab 编写了 VO₂ 的电导率、介电常数、折射率计算代码, 并列举 7 个例子帮助大家理解;
- 计算所需的内存: 无;
- 本案例包含 Matlab 程序文件和参考文献。

包含的文件截图:

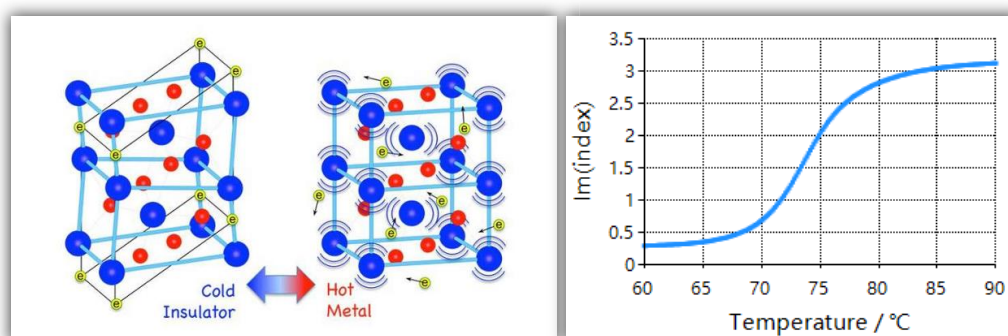


详细描述:

二氧化钒 (VO₂) 是一种相变材料, 其物理和化学性质可以通过改变温度来大幅度地调节, 从而可以用来设计温控器件。

VO₂ 的相变温度在 $T_0 \approx 68\text{ }^\circ\text{C}$ 附近,

- 当温度低于 T_0 时为绝缘态, 展现出电介质的特性
- 当温度高于 T_0 时为金属态, 展现出金属的特性, 可以导电。



VO₂ 的相变特性主要在其电导率、介电常数、折射率等参数上体现出来, 也就是说 VO₂ 的这些光学参数不仅是频率(ω)的函数, 也是温度(T)的函数。更麻烦的是, 这些物理量还都是复数, 即:

$$\sigma = \sigma'(\omega, T) + i\sigma''(\omega, T)$$

$$\varepsilon = \varepsilon'(\omega, T) + i\varepsilon''(\omega, T)$$

$$n = n'(\omega, T) + in''(\omega, T)$$

目前人们主要通过**两种方式**来对 VO₂ 的光学性质进行建模:

- **第一种**是认为 VO₂ 在任意温度下的介电常数都满足 Drude 模型, 然后将等离子体频率和碰撞频率拟合成温度的函数
- **第二种**是认为 VO₂ 的金属态满足 Drude 模型, 绝缘态的介电常数是一个不随温度变化的常数, 而相变温度附近 VO₂ 是金属态和绝缘态的混合物。利用混合物等效介质理论求出相变温度附近的介电常数

以上两种方式计算起来都比较繁琐, 涉及的计算量很大。

为此, 本店参考四篇 SCI 论文, 基于 Matlab 编写了 VO₂ 光学常数计算代码。

由于代码量大, 列举的 example 多, 这里仅展示代码相对较少的“example2.m”及其对应的“VO2_Choi1996_model()”函数, 程序截图如下, 注释中详细介绍了每个参数的含义及参考文献列表:

```

example2.m × +
1      % 本例将函数 VO2_Choi1996_model() 算出的结果与论文:
2      % Mi... .. on
3      % Fig6ab 中的圆点 (实验数据) 对比, 两者完全一致
4
5 -    clear; clc; clf; close all;
6
7 -    omega_cm = 1600:83:4000;
8 -    lmd_um = 1./(100*omega_cm)*1e6;
9
10 -   T_dc = 88;
11 -   [epsilon, index, sigma] = VO2_Choi1996_model(lmd_um, T_dc, 'steady');
12
13 -   figure;
14 -   plot(omega_cm, real(epsilon), 'o');
15 -   xlabel('omega(cm^{-1})'); ylabel('epsilon');
16 -   title('Choi1996 Fig. 6(a)');
17 -   axis([0, 5000, -100, 20]);
18
19 -   figure;
20 -   plot(omega_cm, real(sigma)/100, 'o');
21 -   xlabel('omega(cm^{-1})'); ylabel('sigma(Ohm^{-1} * cm^{-1})');
22 -   title('Choi1996 Fig. 6(b)');
23 -   axis([0, 5000, 0, 3000]);
24

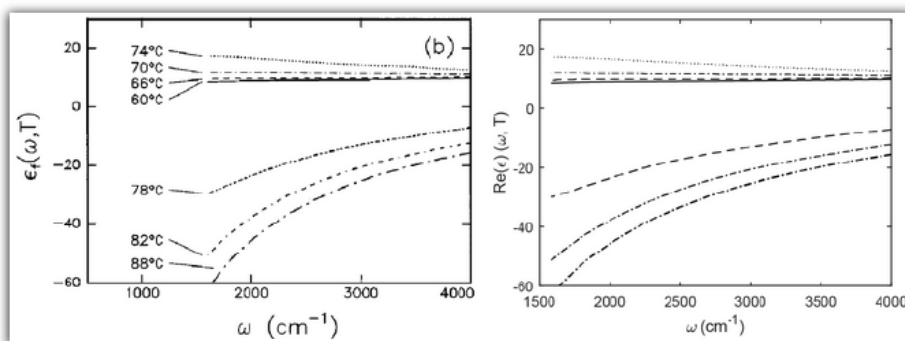
```

```

example2.m x VO2_Choi1996_model.m x +
1 function [epsilon, index, sigma] = VO2_Choi1996_model(lmd_um, T_dC, state)
2 % 本程序用于计算二氧化钒 (VO2) 的相对介电常数、折射率、电导率
3 % 适用温度: 无限制
4 % 适用波长: 2.5 ~ 6.3 um
5 %%% 输入参数:
6 % lmd_um - 波长, 单位 um <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<
7 % T_dC - 温度, 单位摄氏度
8 % state - 表示升温、降温或稳态, 输入 'up'、'down' 或 'steady'
9 %%% 输出参数:
10 % epsilon - 相对介电常数
11 % index - 折射率
12 % sigma - 电导率, 单位: S/m
13 %%% 参考文献:
14 % [Choi, J., et al., Appl. Phys. Lett., 1996, Vol. 68, No. 12, p. 1698]
15 % [Choi, J., et al., Appl. Phys. Lett., 1996, Vol. 68, No. 12, p. 1698]
16
17 if(min(lmd_um) < 2.5 || max(lmd_um) > 6.3)
18     epsilon = NaN; index = NaN; sigma = NaN; return;
19 end
20
21 %% 定义常数
22 eps0 = 8.854187817e-12;
23 e0 = 1.602176634e-19;
24 c = 299792458;
25 h = 6.62607015e-34;

```

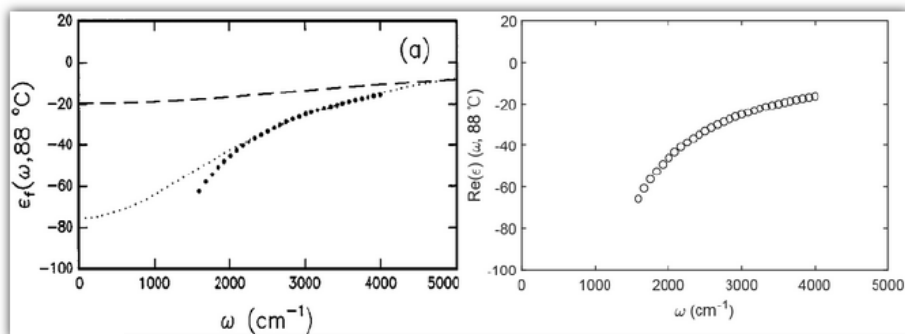
example1.m 绘制的结果:



文献中的结果

Matlab 画出的结果

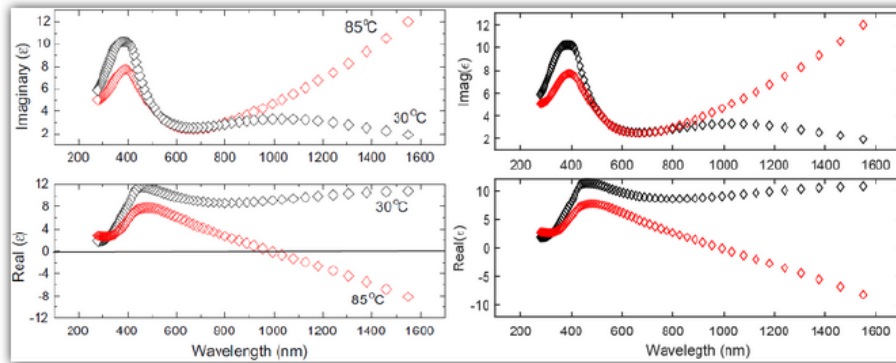
example2.m 绘制的结果:



文献中的结果

Matlab 画出的结果

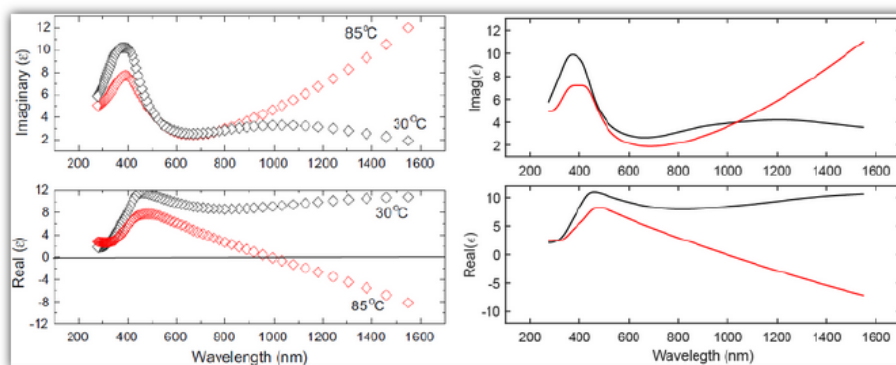
example3.m 绘制的结果:



文献中的结果

Matlab 画出的结果

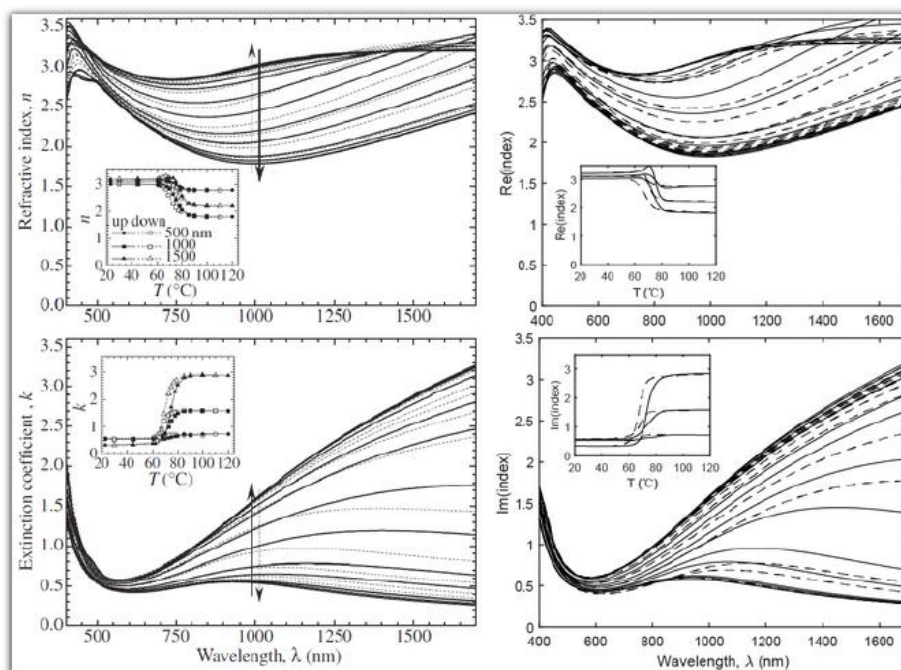
example4.m 绘制的结果:



文献中的结果

Matlab 画出的结果

example5.m 和 example6.m (内插图) 绘制的结果:



文献中的结果

Matlab 画出的结果

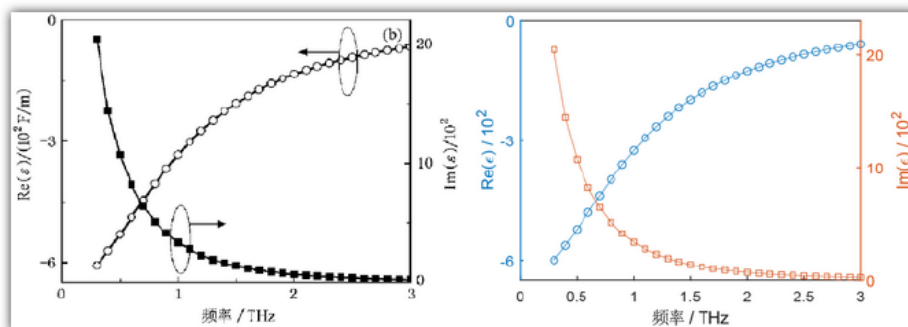
如需购买案例请到作者个人主页: <http://opt-simul.com/>

备用主页: https://mbd.pub/o/opt_simul/work

淘宝店铺: <https://shop511834854.taobao.com/>

检查更新
Check for Update

example7.m 绘制的结果:



文献中的结果

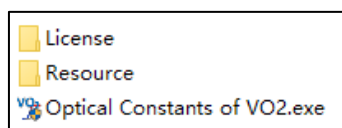
Matlab 画出的结果

033 – [自编软件] VO₂ 的光学常数计算软件 (exe 应用程序, 免费试用版)

基本介绍:

- 主要内容: 本店参考四篇 SCI 论文, 自主开发了计算 VO₂ 电导率、介电常数、折射率的计算软件, windows 平台 exe 应用程序;
- 计算所需的内存: 无;
- 本案例包含一个本店自主开发的软件。

包含的文件截图:

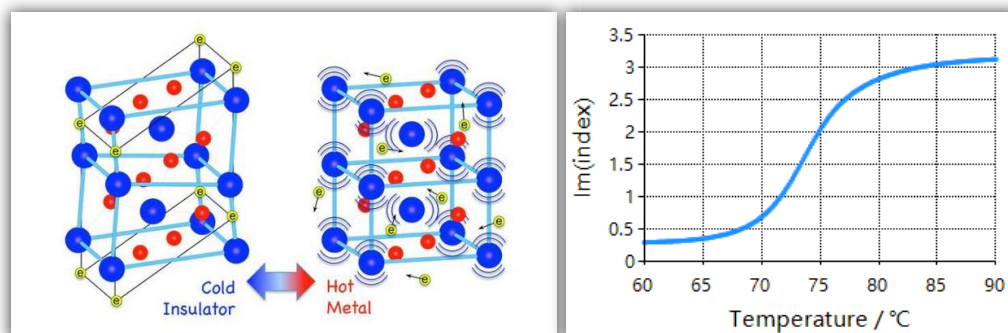


详细描述:

二氧化钒 (VO₂) 是一种相变材料, 其物理和化学性质可以通过改变温度来大幅度地调节, 从而可以用来设计温控器件。

VO₂ 的相变温度在 $T_0 \approx 68\text{ }^\circ\text{C}$ 附近,

- 当温度低于 T_0 时为绝缘态, 展现出电介质的特性
- 当温度高于 T_0 时为金属态, 展现出金属的特性, 可以导电。



VO₂ 的相变特性主要在其电导率、介电常数、折射率等参数上体现出来, 也就是说 VO₂ 的这些光学参数不仅是频率(ω)的函数, 也是温度(T)的函数。更麻烦的是, 这些物理量还都是复数, 即:

$$\sigma = \sigma'(\omega, T) + i\sigma''(\omega, T)$$

$$\varepsilon = \varepsilon'(\omega, T) + i\varepsilon''(\omega, T)$$

$$n = n'(\omega, T) + in''(\omega, T)$$

目前人们主要通过**两种方式**来对 VO₂ 的光学性质进行建模:

- **第一种**是认为 VO₂ 在任意温度下的介电常数都满足 Drude 模型, 然后将等离子体频率和碰撞频率拟合成温度的函数
- **第二种**是认为 VO₂ 的金属态满足 Drude 模型, 绝缘态的介电常数是一个不随温度

如需购买案例请到作者个人主页：<http://opt-simul.com/>

备用主页：https://mbd.pub/o/opt_simul/work

淘宝店铺：<https://shop511834854.taobao.com/>

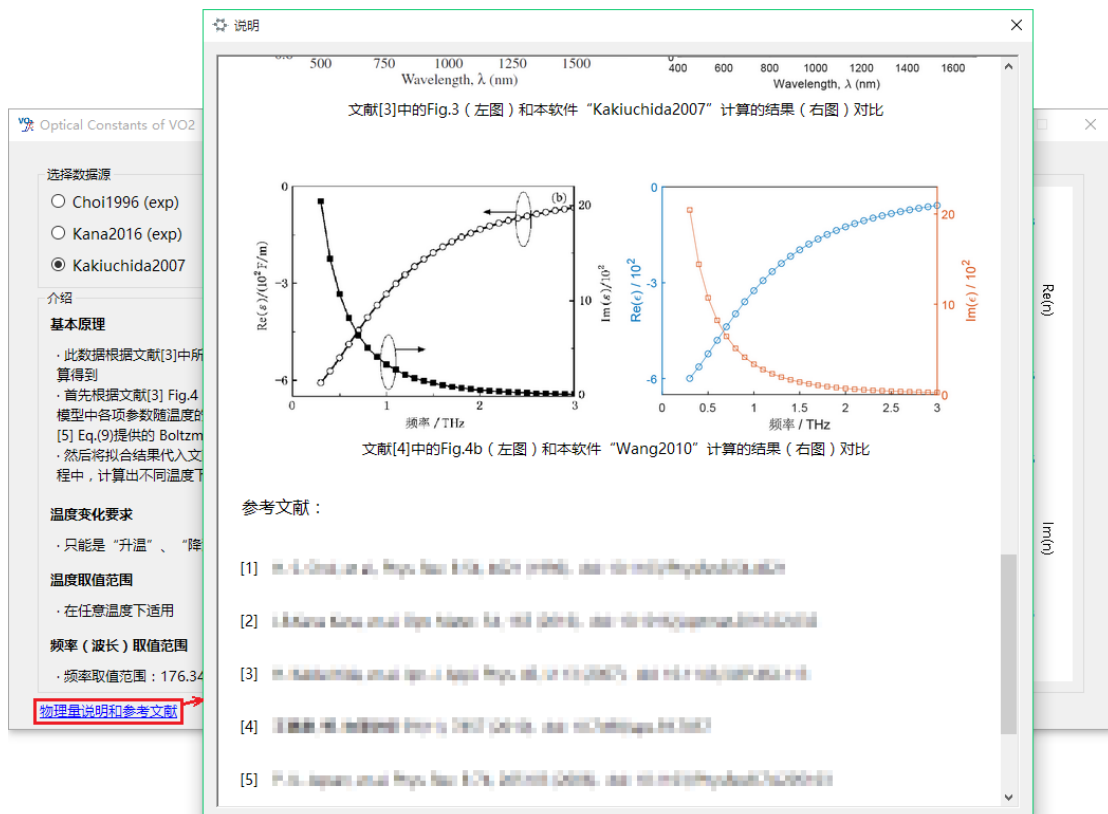
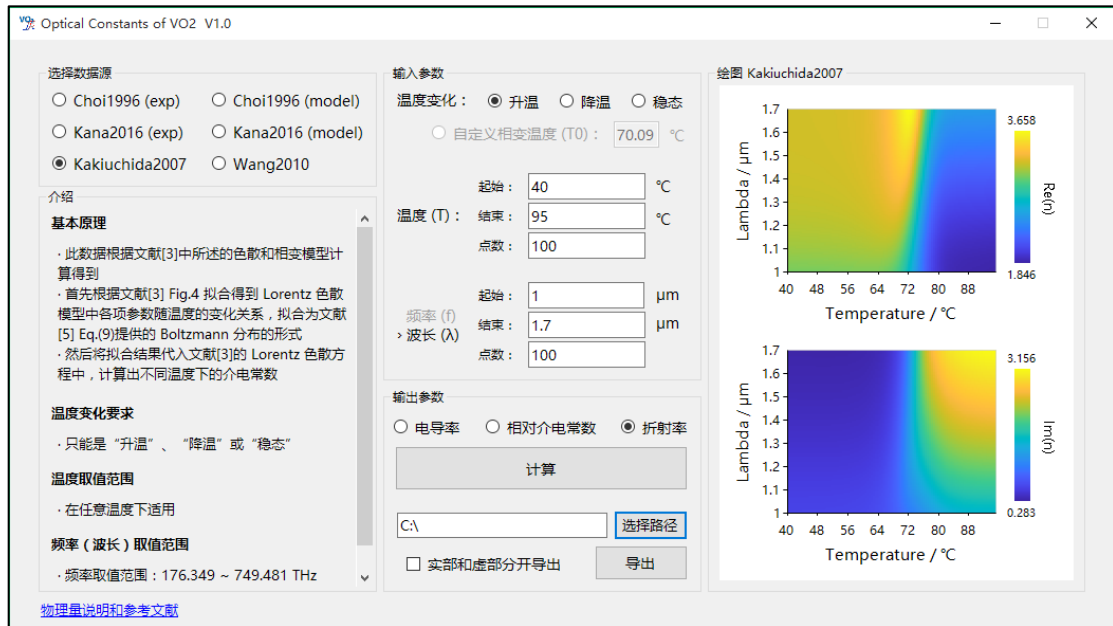
检查更新
Check for Update

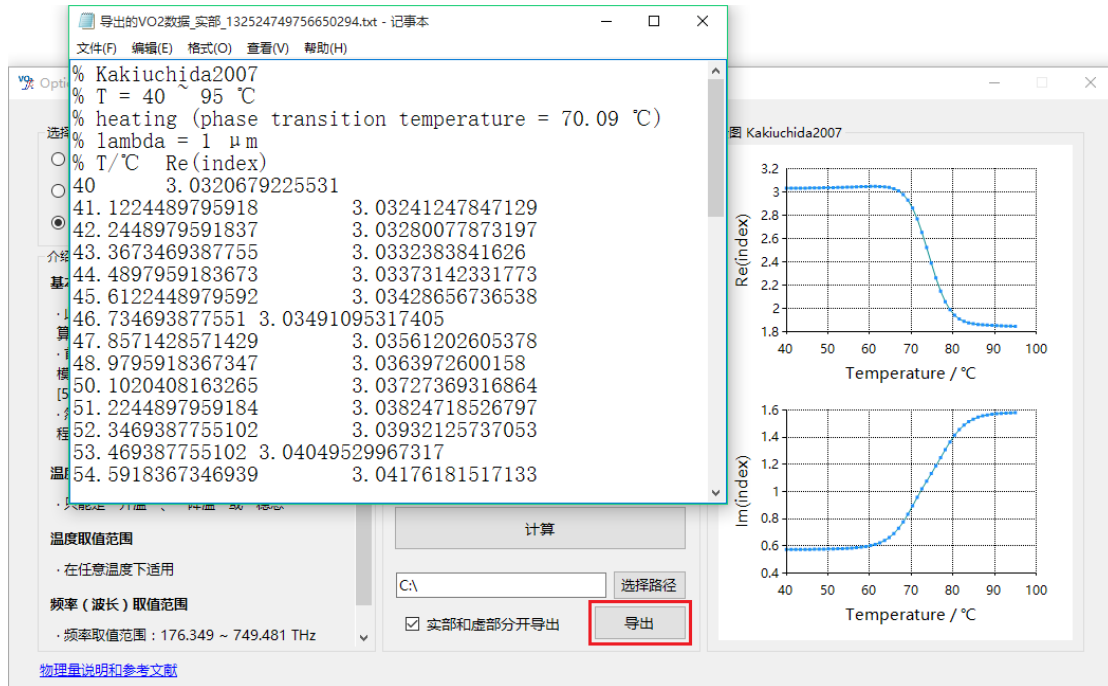
变化的常数，而相变温度附近 VO_2 是金属态和绝缘态的混合物。利用混合物等效介质理论求出相变温度附近的介电常数

以上两种方式计算起来都比较繁琐，涉及的计算量很大。

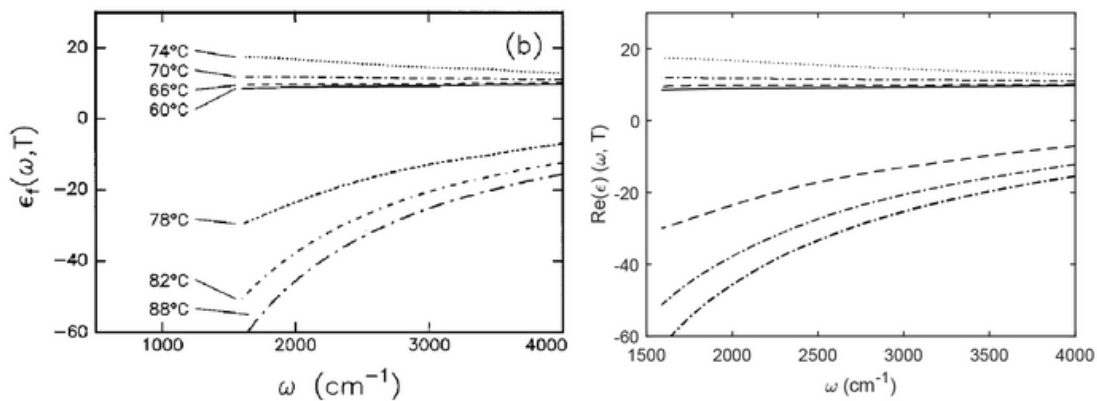
为此，本店参考四篇 SCI 论文，自主开发了 VO_2 光学常数计算软件，是一个独立的 exe 应用程序，可在 windows 平台运行。

软件界面：

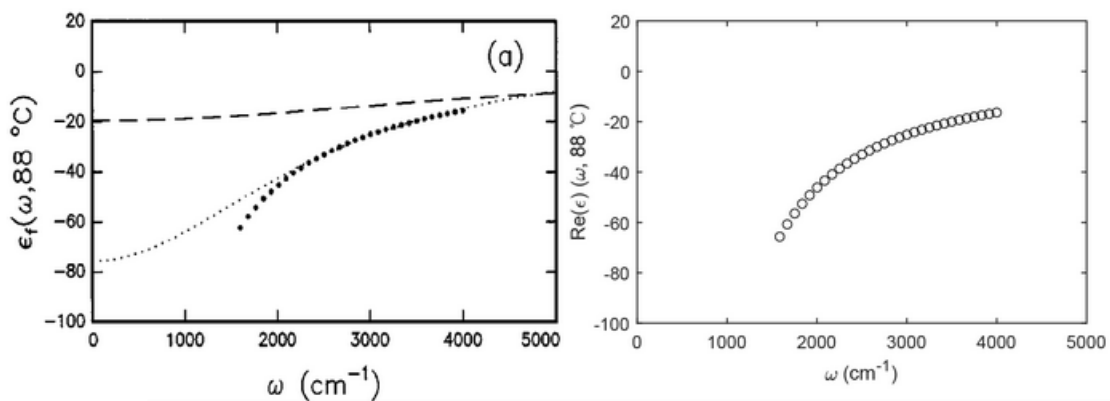




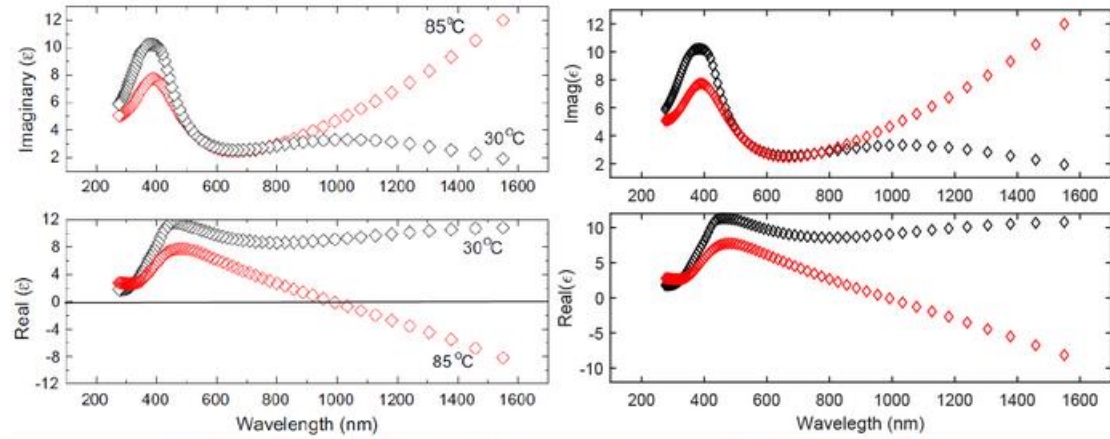
计算结果验证:



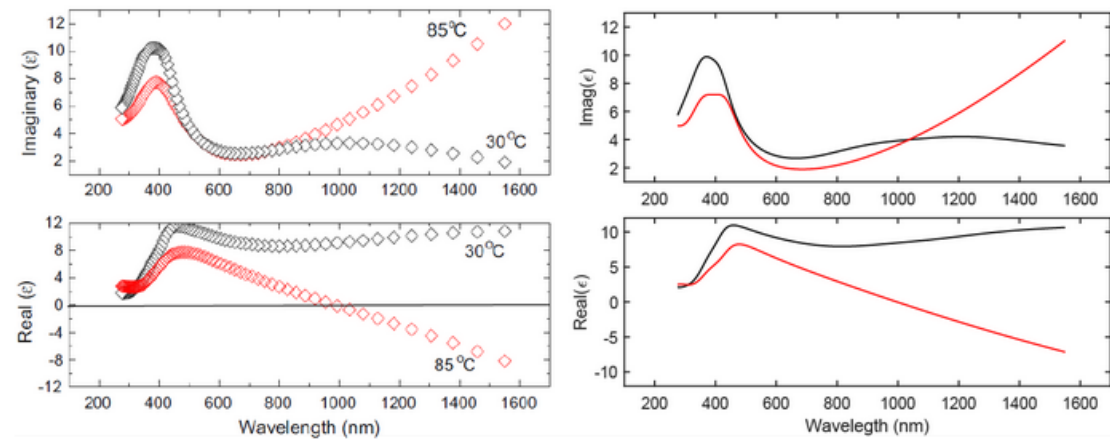
文献[1]中的Fig.5b (左图) 和本软件“Choi1996 (exp)”导出的结果(右图)对比



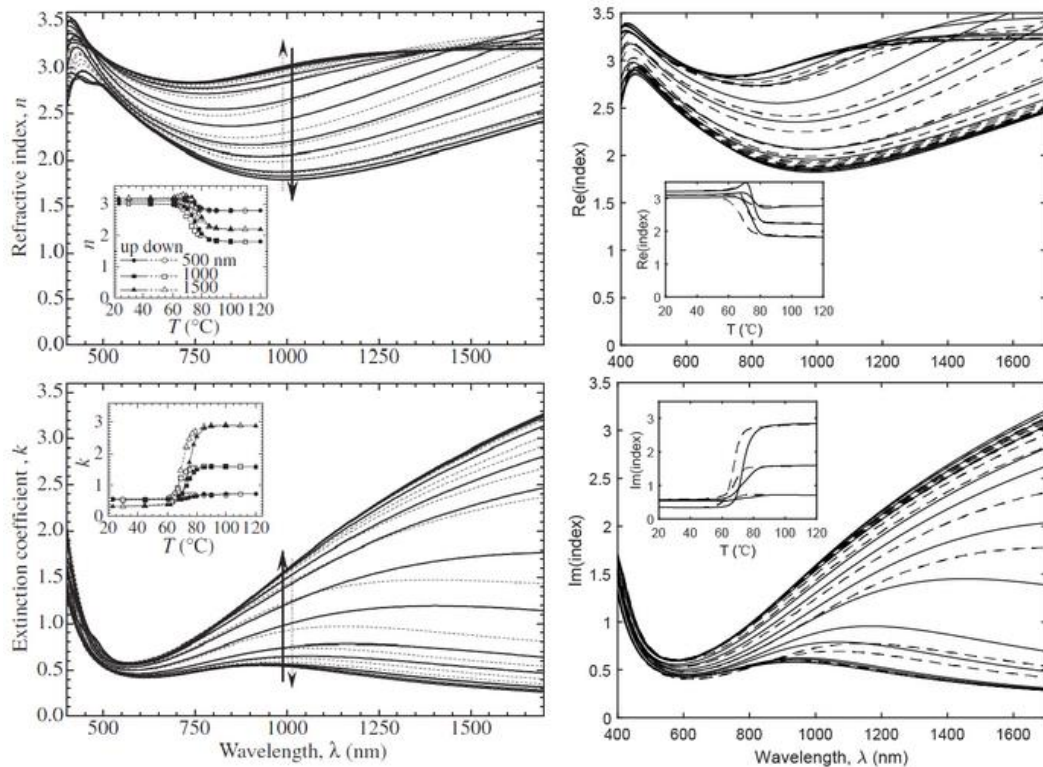
文献[1]中的Fig.6a (左图) 和本软件“Choi1996 (model)”计算的结果(右图)对比



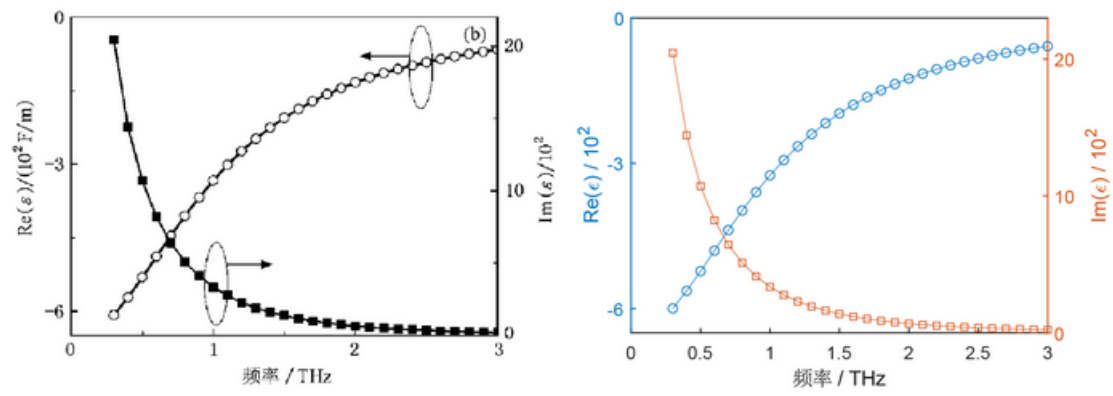
文献[2]中的Fig.3 (左图) 和本软件“Kana2016 (exp)” 导出的结果 (右图) 对比



文献[2]中的Fig.3 (左图) 和本软件“Kana2016 (model)” 计算的结果 (右图) 对比



文献[3]中的Fig.3 (左图) 和本软件“Kakiuchida2007” 计算的结果 (右图) 对比



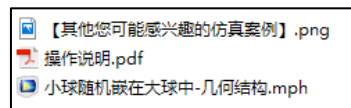
文献[4]中的Fig.4b (左图) 和本软件“Wang2010”计算的结果 (右图) 对比

034 – COMSOL 编写代码绘制几何：小球随机嵌在大球中（仅模型文件，30 元）

基本介绍：

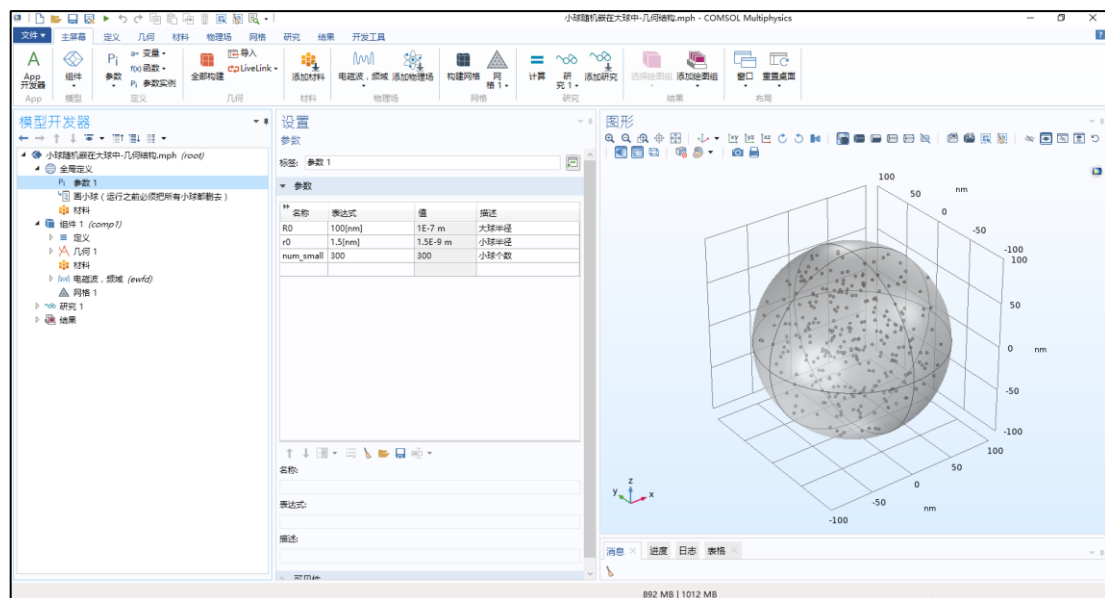
- 主要内容：利用 COMSOL 自带的脚本工具编写代码，绘制复杂的几何结构，本案例绘制了“小球随机嵌在大球中”，具体请看下面图片；
- 使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：无；
- 涉及的内容：App 开发器，模型方法；
- 本案例仅包含模型文件（但有一个如何使用代码的说明文档）。

包含的文件截图：



详细描述：

1、打开模型后看到下图所示的界面，图中左侧的“全局定义-参数 1”中定义了大球的半径 $R0 = 100 \text{ nm}$ 、小球半径 $r0 = 1.5 \text{ nm}$ 、共画了 300 个小球。



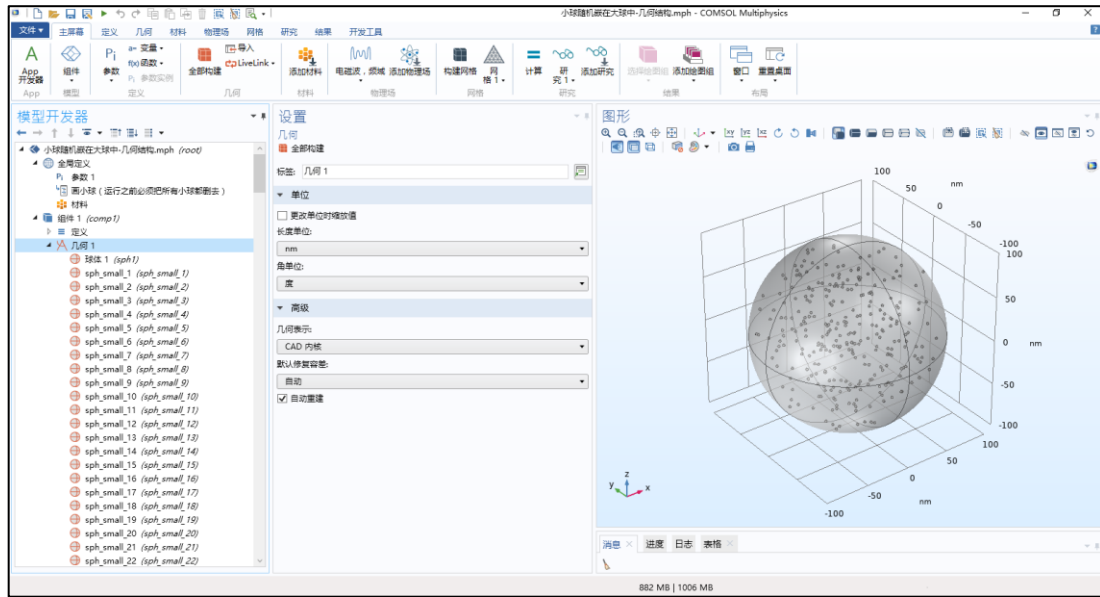
如需购买案例请到作者个人主页：<http://opt-simul.com/>

备用主页：https://mbd.pub/o/opt_simul/work

淘宝店铺：<https://shop511834854.taobao.com/>

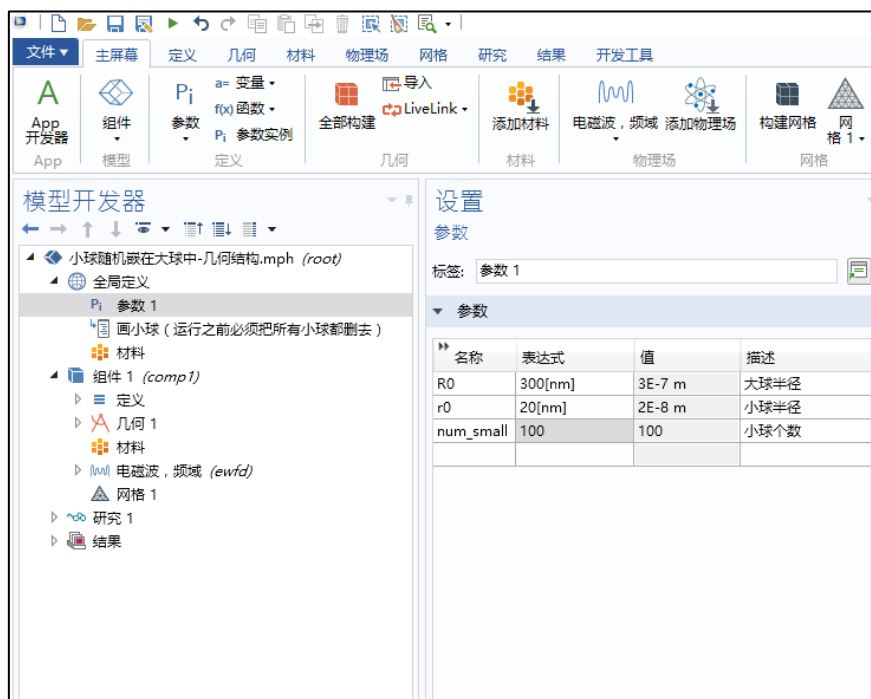
检查更新
Check for Update

2、展开左侧的“几何 1”，如下图，可以看到 1 个大球和 300 个小球的对象。



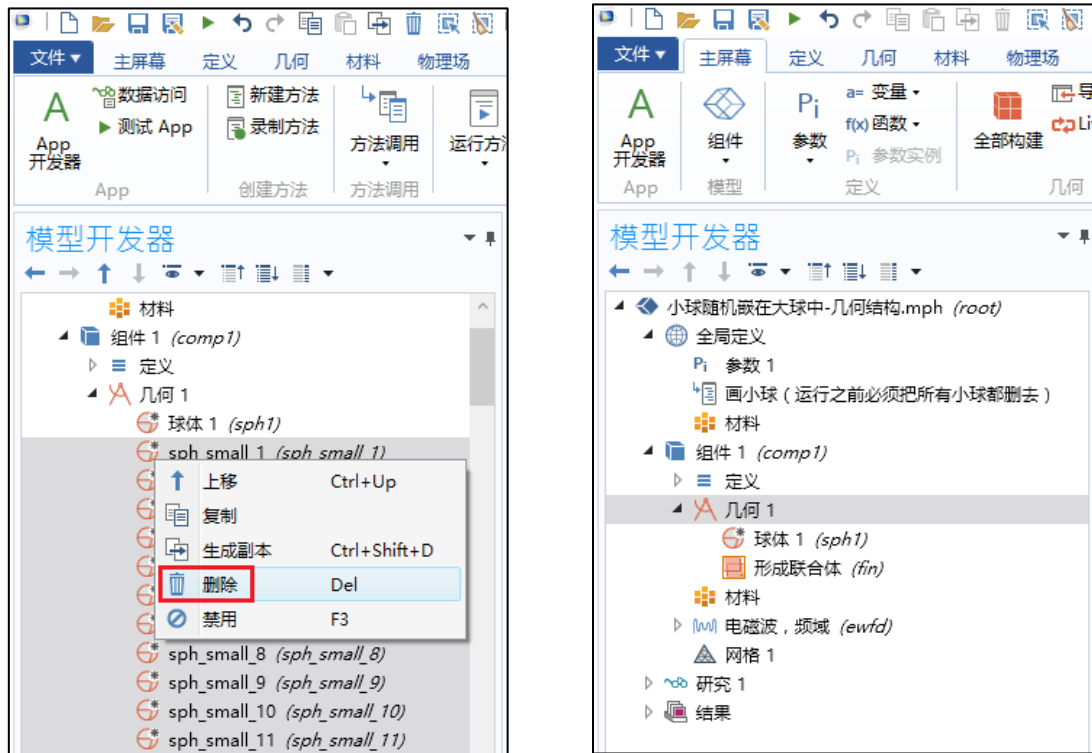
3、如果要更改参数，例如将大球半径改为 300 nm、小球半径改为 20 nm、画 100 个小球，按照下面的方法操作：

(1) 在“参数 1”中修改参数，如下图：

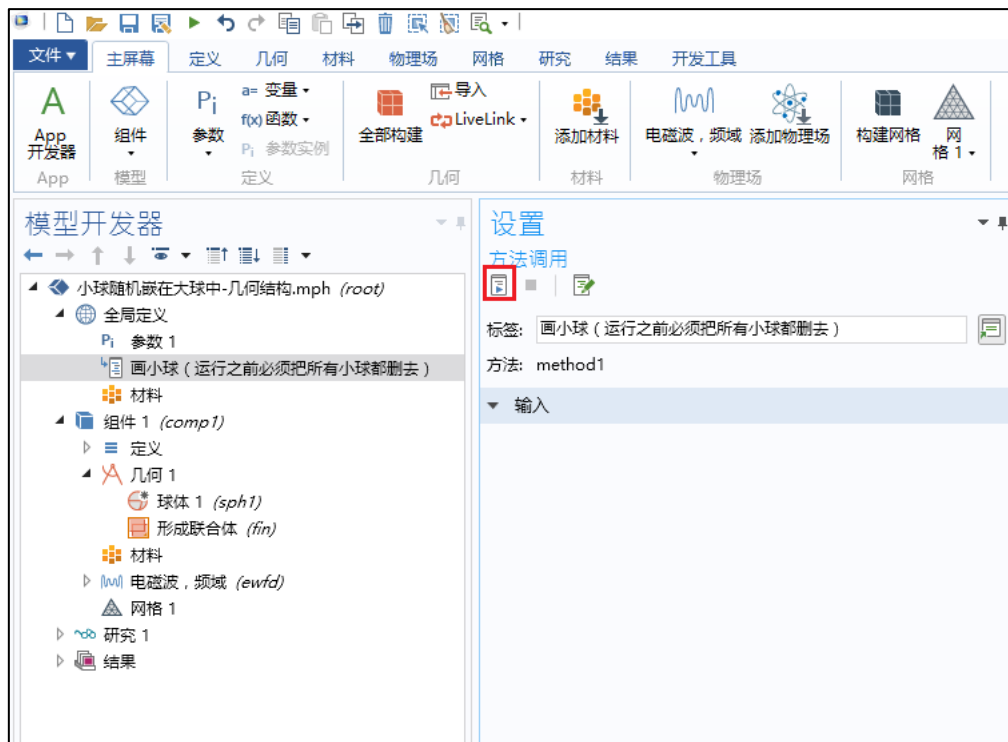


(转下页)

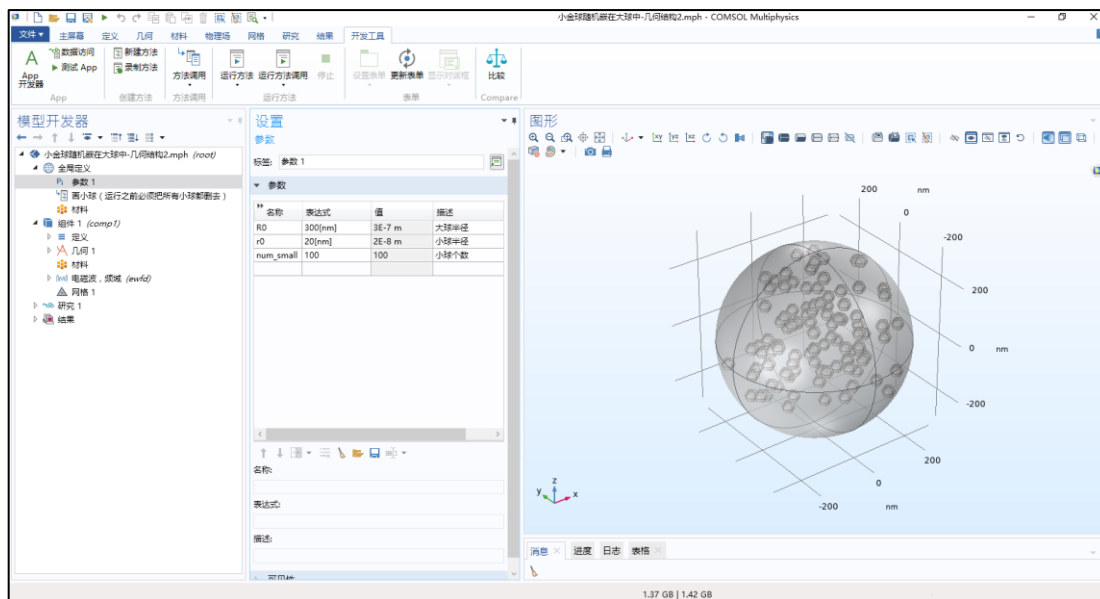
(2) 在“几何 1”中将所有的小球删去，只保留大球，如下图：



(3) 选中“画小球（运行之前必须把所有小球都删去）”，并运行此方法调用，如下图：



(4) 这样就画出了结构，如下图。由于小球是随机画出的，所以您的小球的排列方式会与我下面的截图不一样：

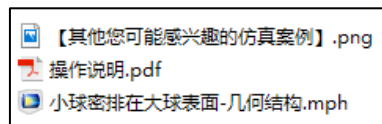


035 – COMSOL 编写代码绘制几何：小球密排在大球表面（仅模型文件，30 元）

基本介绍：

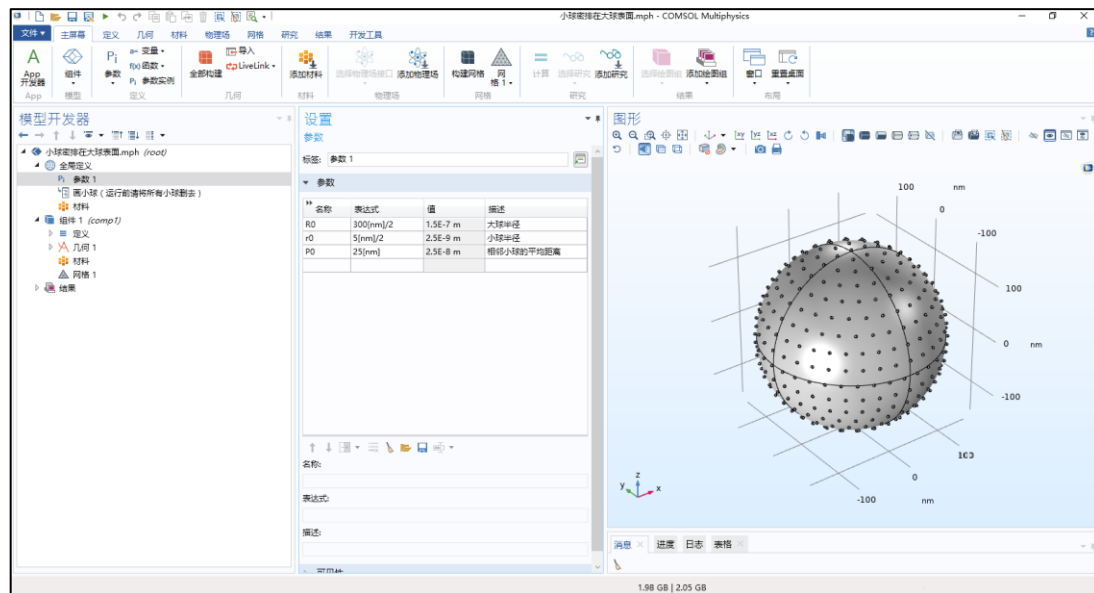
- 主要内容：利用 COMSOL 自带的脚本工具编写代码，绘制复杂的几何结构，本案例绘制了“小球密排在大球表面”，具体请看下面图片；
- 使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：无；
- 涉及的内容：App 开发器，模型方法；
- 本案例仅包含模型文件（但有一个如何使用代码的说明文档）。

包含的文件截图：



详细描述：

1、打开模型后看到下图所示的界面，图中左侧的“全局定义-参数 1”中定义了大球的半径 $R0 = 150 \text{ nm}$ 、小球半径 $r0 = 2.5 \text{ nm}$ 、相邻小球的平均距离约 25 nm 。



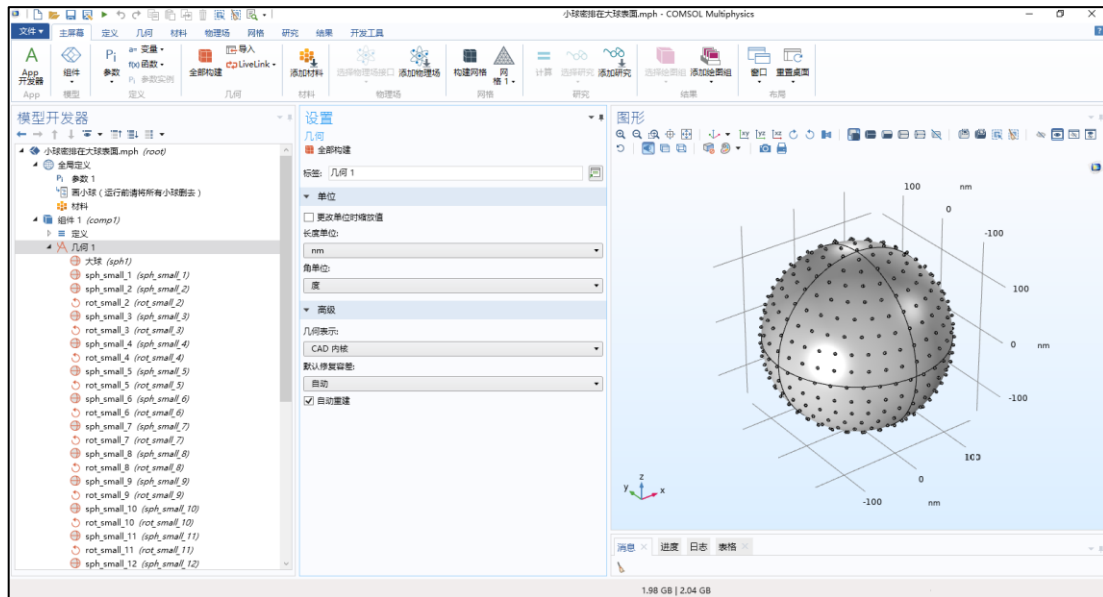
如需购买案例请到作者个人主页：<http://opt-simul.com/>

备用主页：https://mbd.pub/o/opt_simul/work

淘宝店铺：<https://shop511834854.taobao.com/>

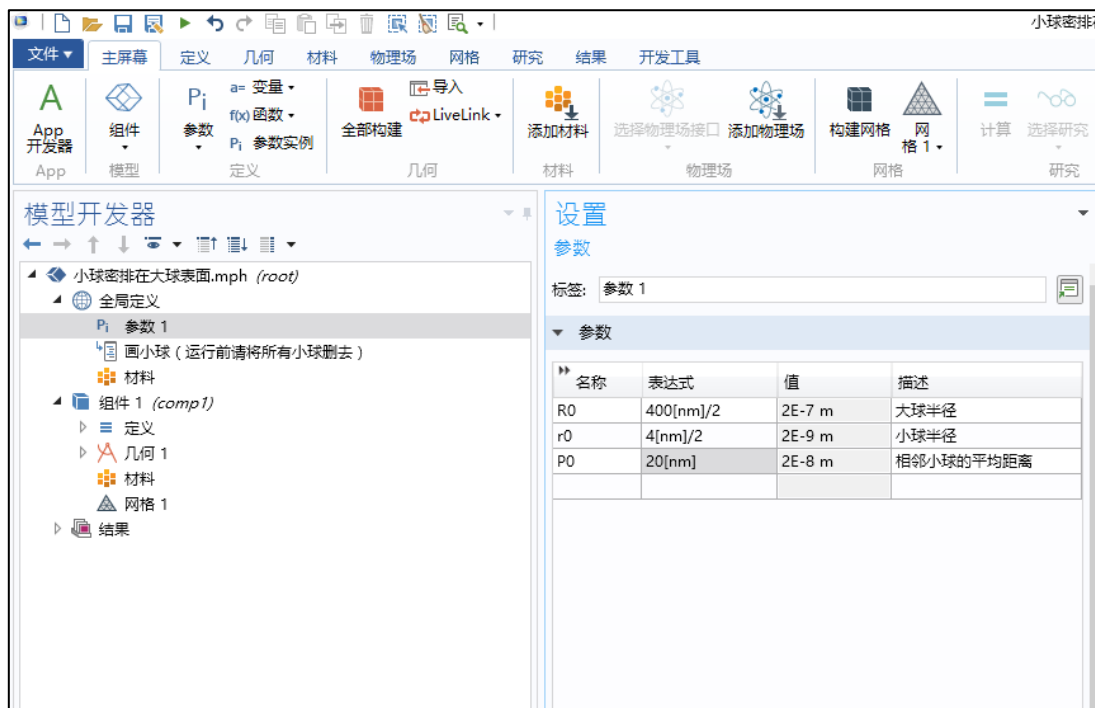
检查更新
Check for Update

2、展开左侧的“几何 1”，如下图，可以看到 1 个大球和许多小球的对象。实际上这里面一共有 422 个小球。

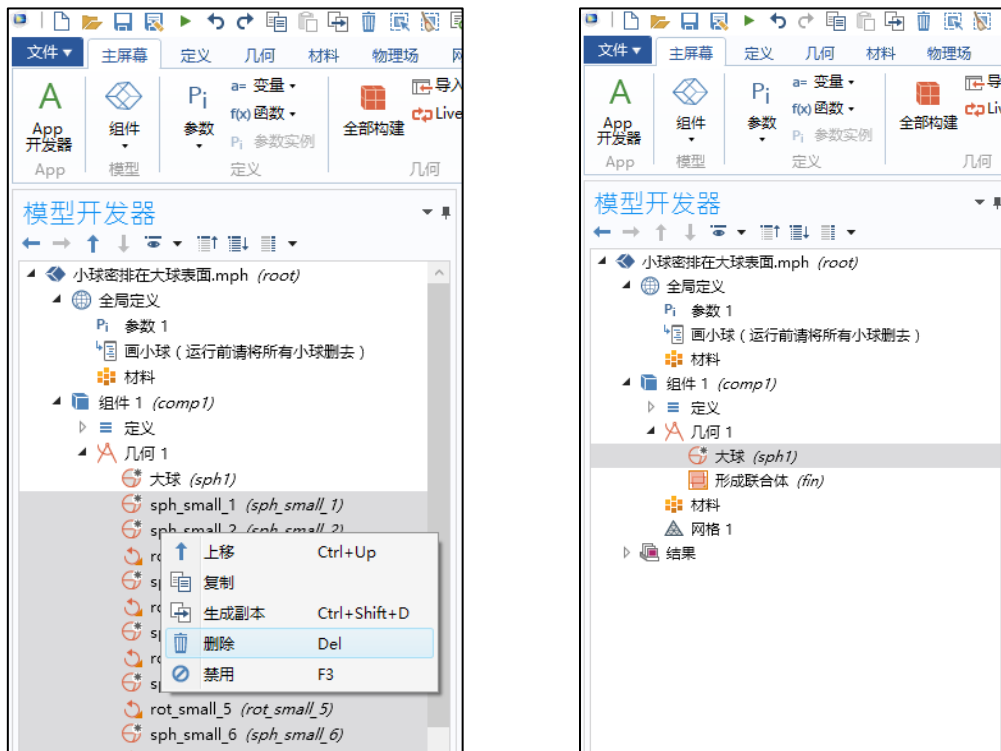


3、如果要更改参数，例如将大球半径改为 200 nm、小球半径改为 2 nm、相邻小球的平均距离约 20 nm，按照下面的方法操作：

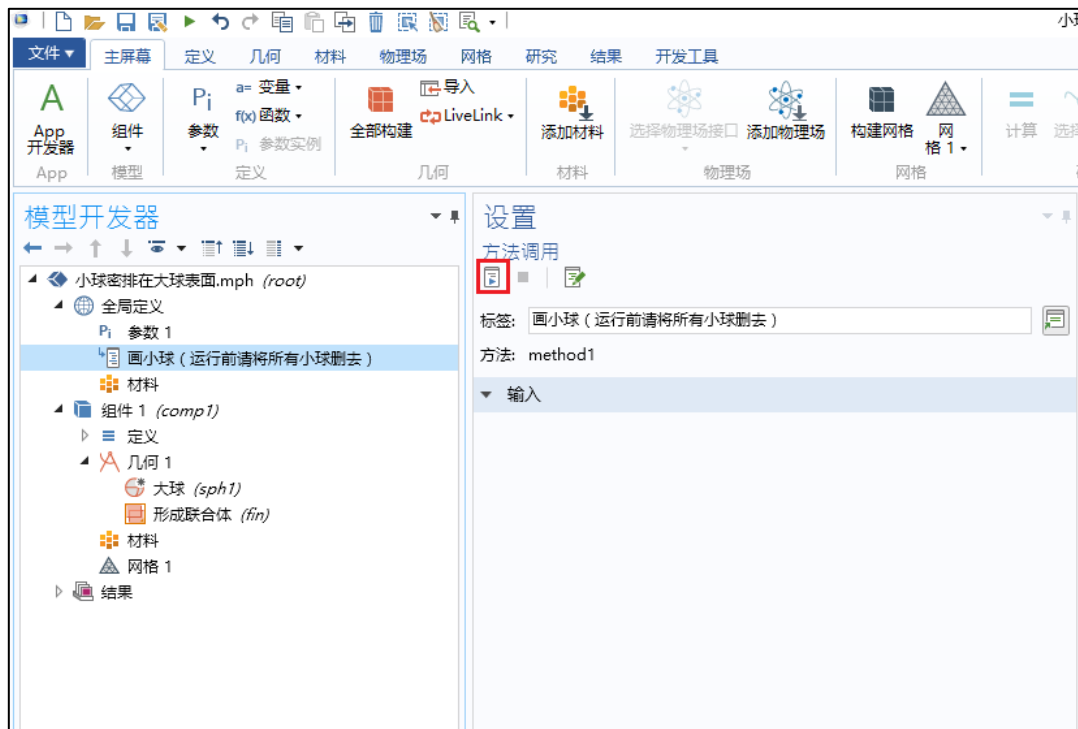
(1) 在“参数 1”中修改参数，如下图：



(2) 在“几何 1”中将所有的小球删去，只保留大球，如下图：



(3) 选中“画小球（运行之前请将所有小球都删去）”，并运行此方法调用，如下图所示：



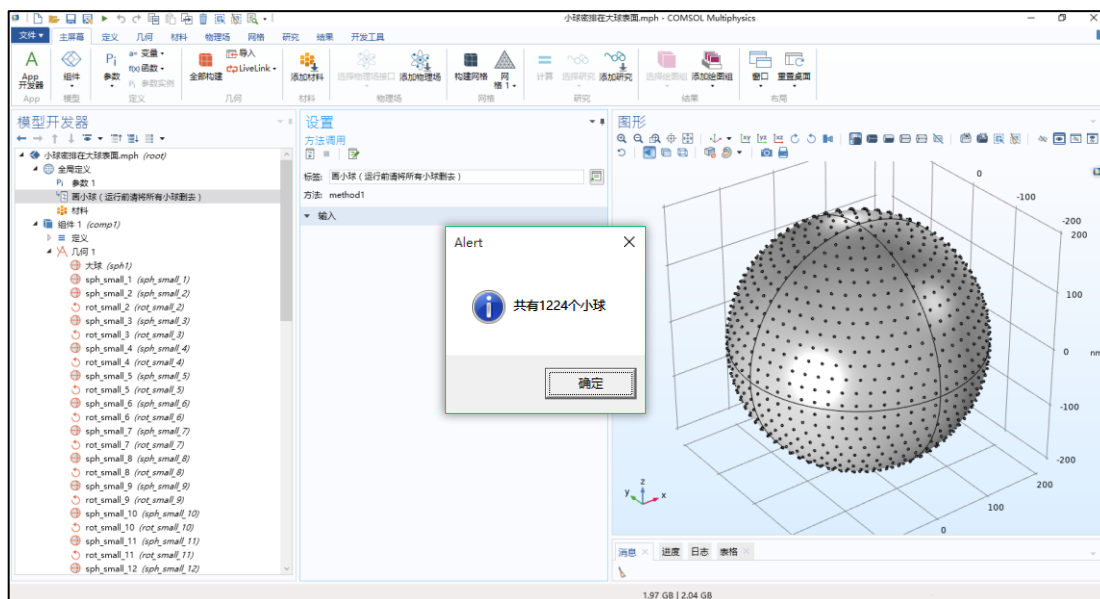
如需购买案例请到作者个人主页：<http://opt-simul.com/>

备用主页：https://mbd.pub/o/opt_simul/work

淘宝店铺：<https://shop511834854.taobao.com/>

检查更新
Check for Update

(4) 这样就画出了结构，如下图。画完之后还会提示“共有 1224 个小球”：

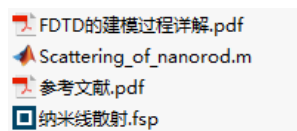


036 – FDTD 纳米线的光散射 (仅模型文件, 免费)

基本介绍:

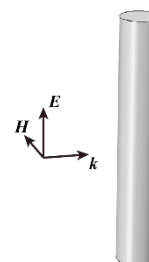
- 主要内容: 本案例通过 matlab 解析和 FDTD 模拟分别计算了半径 100 nm 的纳米线对 TM 光的散射截面, 两者完全吻合;
- 基于 Lumerical FDTD Solution 求解, 使用的软件版本为 Lumerical 2020 R2;
- 计算所需的内存: 1 GB;
- 涉及的内容: 2D-FDTD、场监视器、cross-section 分析组、matlab 编程 等;
- 绘制了: 散射截面随波长的关系、电场分布;
- 本案例仅包含模型文件, 但有一个文字版的建模过程详解。

包含的文件截图:

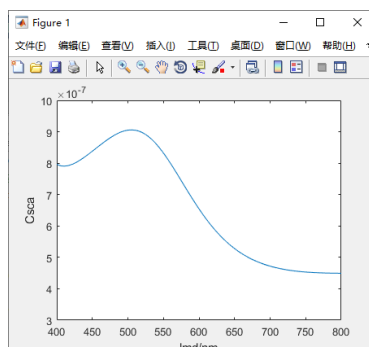
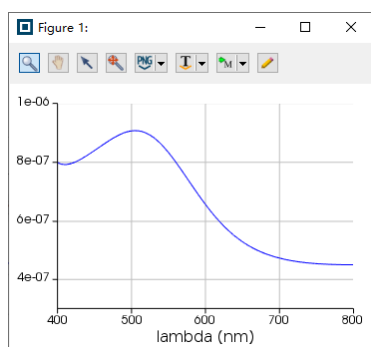


详细描述:

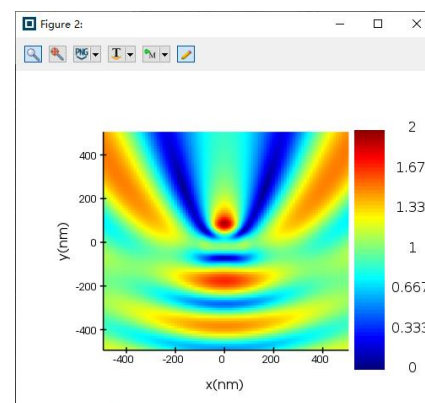
如右图所示, 用 TM 偏振的平面光照射一根无限长的介质纳米线, 纳米线的半径为 100 nm, 折射率为 2。本案例用 FDTD 模拟了 400~800 nm 波长范围内的光散射截面以及电场分布, 并将结果与 matlab 解析计算的散射截面相比较。



计算的内容和结果:



散射截面。左: FDTD 模拟的结果, 右: 用 matlab 解析计算出来的结果



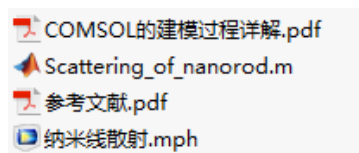
FDTD 模拟的 400nm 处的电场分布

037 – COMSOL 纳米线的光散射（仅模型文件，免费）

基本介绍：

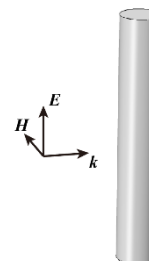
- 主要内容：本案例通过 matlab 解析和 COMSOL 模拟分别计算了半径 100 nm 的纳米线对 TM 光的散射截面，两者完全吻合；
- 基于 COMSOL 频域求解，使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：自定义方程、组件耦合-积分 等；
- 绘制了：散射截面随波长的关系、电场分布；
- 本案例仅包含模型文件，但有一个文字版的建模过程详解。

包含的文件截图：

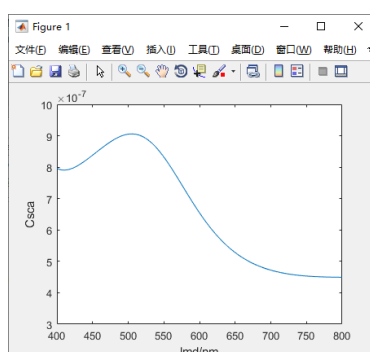
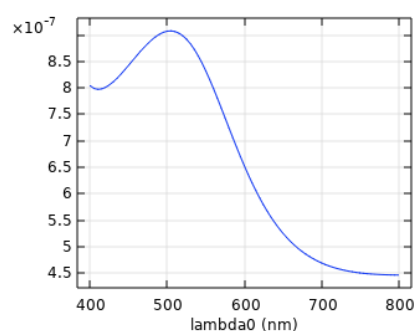


详细描述：

如右图所示，用 TM 偏振的平面光照射一根无限长的介质纳米线，纳米线的半径为 100 nm，折射率为 2。本案例用 COMSOL 模拟了 400~800 nm 波长范围内的光散射截面以及电场分布，并将结果与 matlab 解析计算的散射截面相比较。

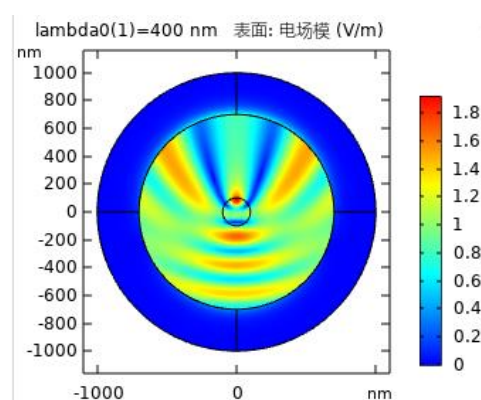


计算的内容和结果：



散射截面。

左：COMSOL 模拟的结果，右：用 matlab 解析计算出来的结果



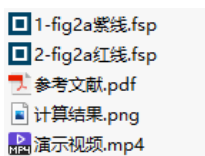
COMSOL 模拟的 400nm 处的电场分布

038 – FDTD MIM 波导电磁感应透明（含演示，50 元）

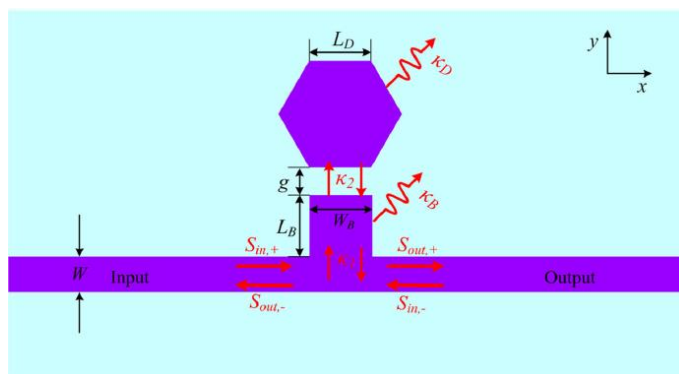
基本介绍：

- 主要内容：根据发表在 *Plasmonics* 上的论文《Plasmon-Induced Transparency and Refractive Index Sensing in Side-Coupled Stub-Hexagon Resonators》（作者：Chuan Wu 等），复现了其中的 Fig.2；
- 基于 Lumerical FDTD Solution 求解，使用的软件版本为 Lumerical 2020 R2；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：在 structure group 中编写脚本画几何结构、自定义 Drude 模型材料、模式光源、2D-FDTD 等；
- 绘制了：透射率随波长的变化曲线、磁场分布；
- 建模过程录制了时长为 22 min 的演示视频（没有声音）。

包含的文件截图：



详细描述：



如上图所示，由 Ag 和空气缝隙构成一个 MIM 波导，波导旁边设置一个六边形的谐振腔。图中 $W = 50 \text{ nm}$, $W_B = 140 \text{ nm}$, $L_B = 120 \text{ nm}$, $L_D = W_B = 140 \text{ nm}$, $g = 30 \text{ nm}$ 。Ag 材料用 Drude 模型描述：

$$\varepsilon(\omega) = \omega_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}$$

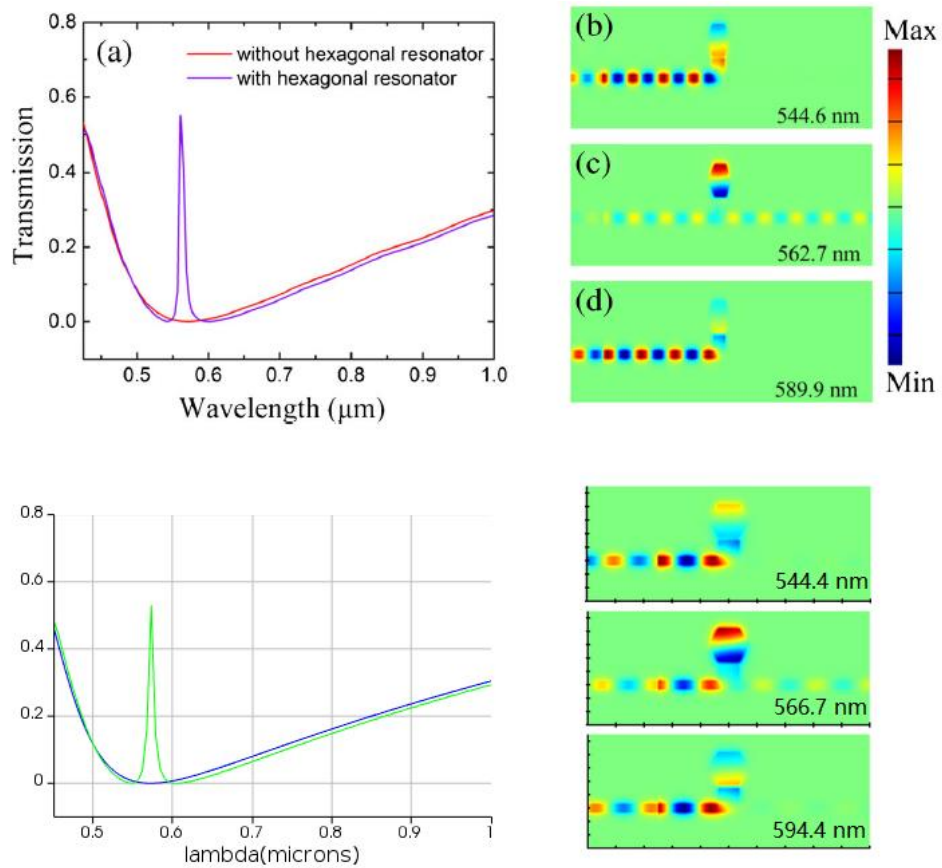
其中 $\omega_\infty = 3.7$, $\omega_p = 9.1 \text{ eV}$, $\gamma = 0.018 \text{ eV}$ 。

入射光从波导左端入射后，仿真右端出口的透射率和整体的磁场分布。

计算的内容和结果：

（转下页）

透射率曲线和三个不同波长处的磁场 H_z 分布。上: 论文中的图, 下: 本案例做出来的结果

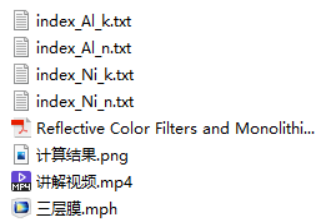


039 – COMSOL 三层薄膜的反射率（含讲解，50 元）

基本介绍：

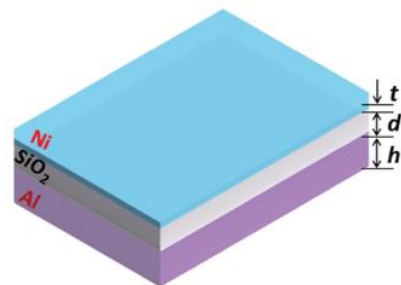
- 主要内容：根据发表在 *Plasmonics* 上的论文《Reflective Color Filters and Monolithic Color Printing Based on Asymmetric Fabry–Perot Cavities Using Nickel as a Broadband Absorber》（作者：Zhengmei Yang 等），复现了其中的 Fig.1d 中的红线；
- 基于 COMSOL 频域求解，使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：全局参数、自定义材料、周期性端口、周期性边界条件、自定义网格 等；
- 绘制了：反射率随波长的变化曲线；
- 建模过程录制了时长为 27 min 的讲解视频。

包含的文件截图：



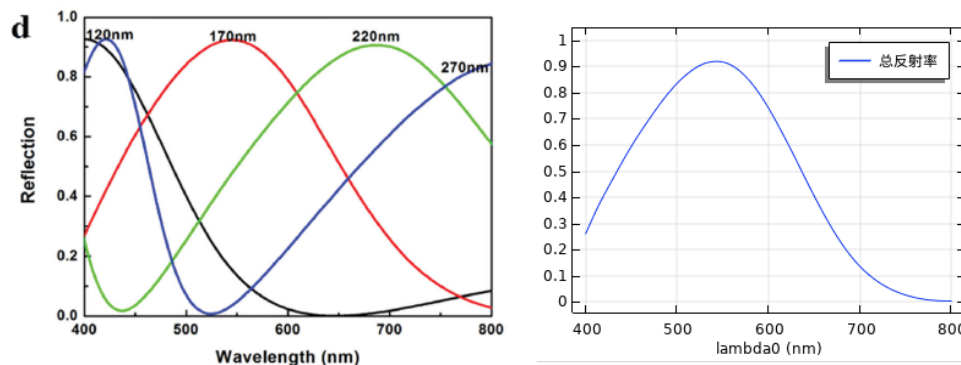
详细描述：

如右图所示，由 Ni、SiO₂、Al 三种材料构成薄膜，厚度分别为 $t = 6$ nm, $d = 170$ nm, $h = 100$ nm。计算波长为 400~800 nm 的光从上往下正入射时的反射率。



计算的内容和结果：

$d = 170$ nm 时的反射率。左图红色线：论文中的结果，右图：本案例的结果

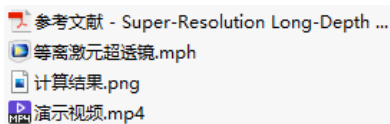


040 – COMSOL 等离子元超透镜（含演示，75 元）

基本介绍：

- 主要内容：根据发表在 *Plasmonics* 上的论文《Super-Resolution Long-Depth Focusing by Radially Polarized Light Irradiation Through Plasmonic Lens in Optical Meso-field》（作者：Ruobing Peng 等），复现了其中的 Fig.2；
- 基于 COMSOL 频域求解，使用的软件版本为 COMSOL 5.4 (5.4.0.225)；
- 计算所需的内存：4 GB；
- 涉及的内容：二维轴对称建模、全局参数、全局解析函数、完美匹配层、自定义材料、散射边界条件、径向偏振环形光源的设置、对数据集的操作、视图的不等比例缩放 等；
- 绘制了：电场分布、焦平面上的三维可视化光强、光轴上的光强分布 等；
- 建模过程录制了时长为 29 min 的演示视频。

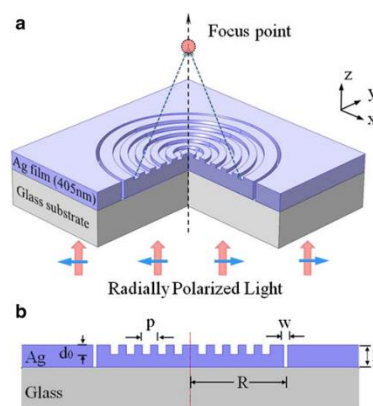
包含的文件截图：



详细描述：

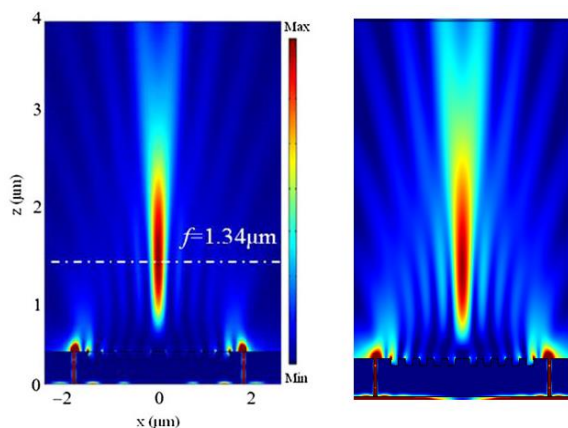
如右图所示，在玻璃衬底上镀一层 405nm 厚的银膜，然后再在银膜上刻蚀同心环状凹槽，形成一个超透镜。图中 $d_0 = 75 \text{ nm}$, $p = 300 \text{ nm}$, $w = 70 \text{ nm}$, $h = 405 \text{ nm}$, $R = 1.83 \text{ }\mu\text{m}$ 。

波长 632.8 nm 的径向偏振环形光源从玻璃衬底中垂直入射，一部分光利用“等离子元增强透射”效应通过最外圈凹槽到达环形光栅处，然后利用光栅的泄露模式转换成自由空间中的电磁波离开光栅，并实现聚焦。

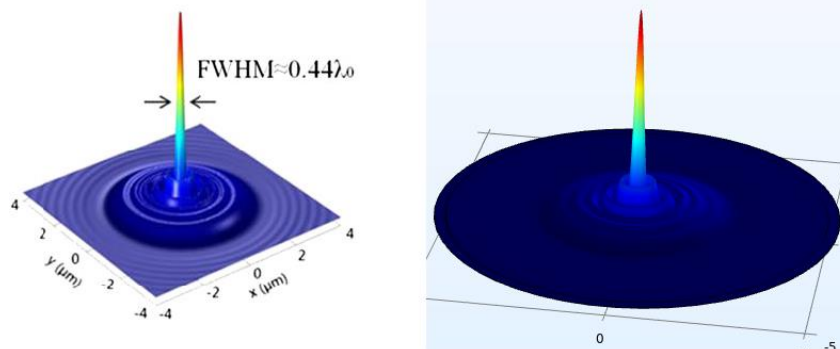


计算的内容和结果：

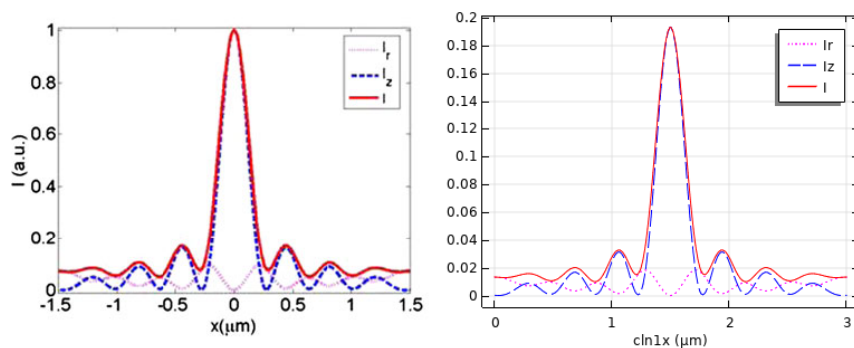
1、xz 截面上的电场分布。左：论文中的图，右：本案例的结果



2、焦平面上的光强三维可视化光强。左: 论文中的图, 右: 本案例的结果



3、焦平面上 r 方向和 z 方向上的光强曲线。左: 论文中的图, 右: 本案例的结果



4、光轴上的光强曲线。左: 论文中的图, 右: 本案例的结果

