

# 基于有效介质理论设计银纳米线隐身衣

## Designing Silver Nanowires Invisible Cloak Based on Effective Medium Approach



徐亚东

苏州大学 物理学院

2010年10月26日

# Outline

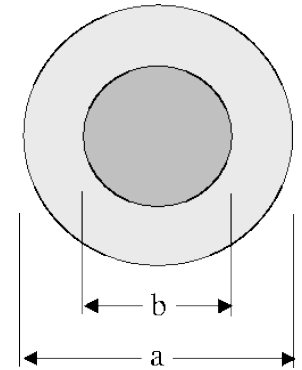
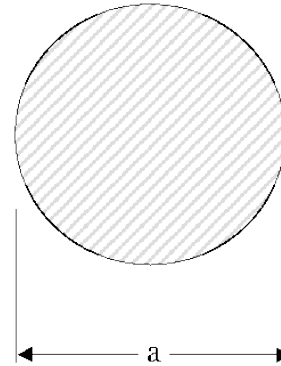
- **The Formula of Nonmagnetic Cloak and An Empirical Revised Version**
- **Effect Medium Approach**
- **Parameter Retrieval Method and Designing Silver Nanowires Invisible Cloak**
- **Conclusion**

# 1. An empirical formula of reduced cloak

## The nonmagnetic cloak

For TM wave

$$\mu_z = 1, \quad \varepsilon_\theta = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2, \quad \varepsilon_r = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \left(\frac{r-a}{r}\right)^2$$



## An empirical version

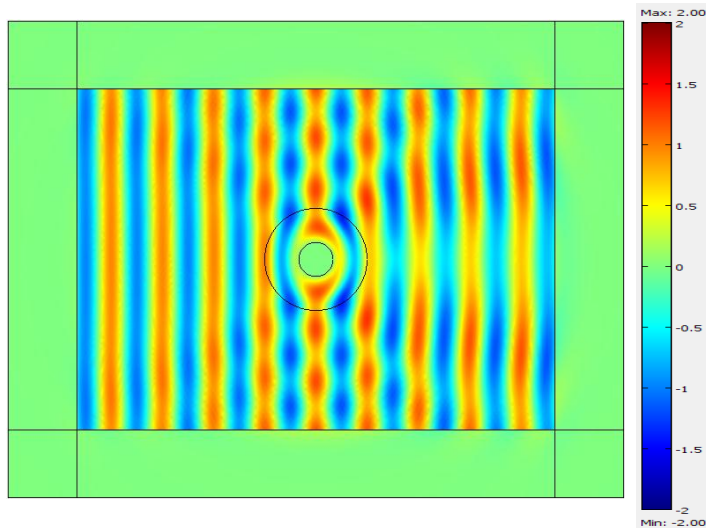
$$\mu_z = 1, \quad \varepsilon_\theta = \eta \left(\frac{b}{b-a}\right)^2, \quad \varepsilon_r = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \left(\frac{r-a}{r}\right)^2 \quad \text{在 } \varepsilon_\theta \text{ 引入比例因子 } \eta$$

1. W. Cai, U. K. Chettiar, A.V. Kildishev, and V. M. Shalaev, *Nat. Photon.* **1**, 224 (2007).

2. S. A. Cummer, B.-I. Popa, D. Schurig, D. R. Smith, and J. B. Pendry, *Phys. Rev. E* **74**, 036621 (2006).

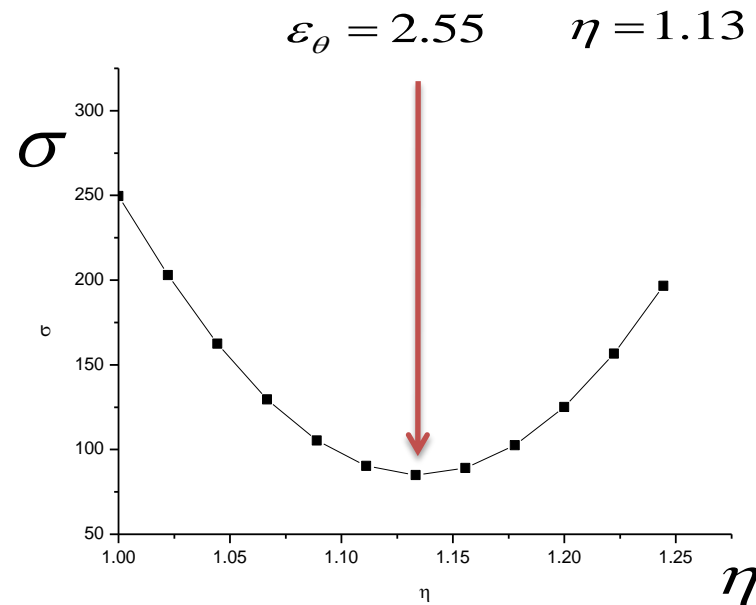
怎么求得比例因子  $\eta$ ，使得 reduced cloak 的隐身效果更好呢？

Total scattering cross section



$a=150\text{nm}$ ,  $b=450\text{nm}$   
wavelength:  $451.7\text{nm}$   
the inner core is PMC

我们通过计算不同  $\eta$  值所对应的 reduced cloak 的总 scattering cross section  $\sigma$ ，寻找一个使得  $\sigma$  最小的  $\eta$ 。



Ideal cloak

reduced cloak  $\eta=1$

reduced cloak  $\eta=1.13$

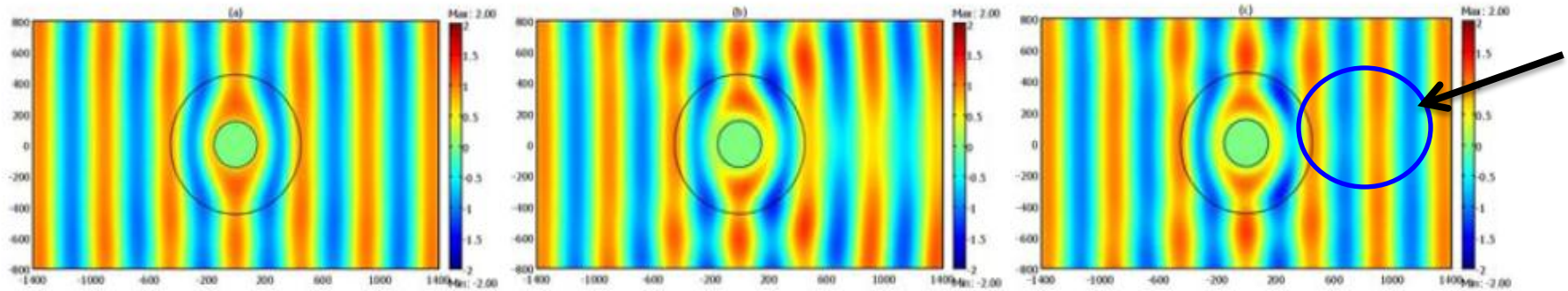


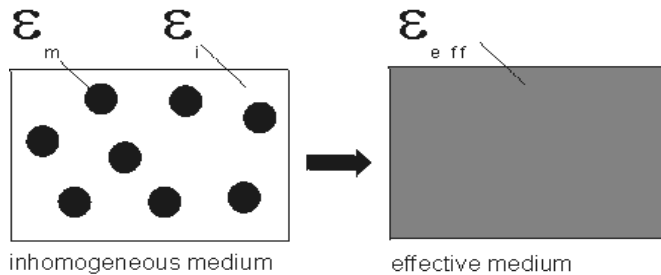
Fig. 1 The scattering patterns of (a) the ideal cloak, (b) the reduced cloak, and (c) the empirical revised version of the reduced cloak.

# 2. Effect Medium Approach

## 有效介质理论

### Effective Medium Approach

波长  $\gg$  不均匀尺寸 (inhomogeneous scale)



常见的介质参数



不常见的介质参数 e.g.  $0 < \epsilon < 1$

### Maxwell-Garnett 理论表达式

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_1}{\epsilon_{eff} + u \times \epsilon_1} = f \times \frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{\epsilon_m + u \times \epsilon_1}$$

背景介质(host)      嵌入介质 (inclusion)

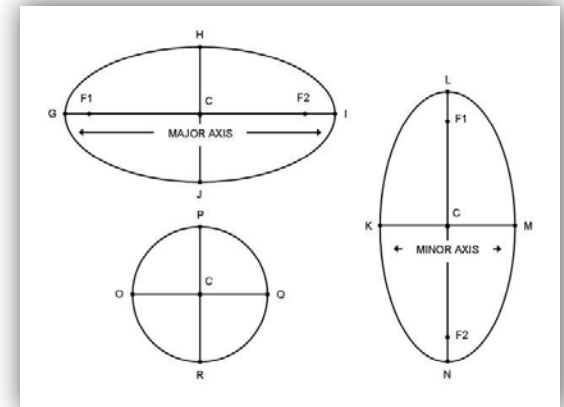
填充因子 (the filling factor)

对椭圆柱(ellipse)的嵌入物:

$$u = \frac{r_y}{r_x}, \text{ or } \frac{r_x}{r_y}$$

$$f = \frac{\pi r_x r_y}{l^2}$$

$l$  晶格常数



因此，选择合适的背景材料和嵌入介质，reduced cloak 所要求的  $\epsilon$  完全可以由  $r_x$ 、 $r_y$  和  $l$  确定。

但是

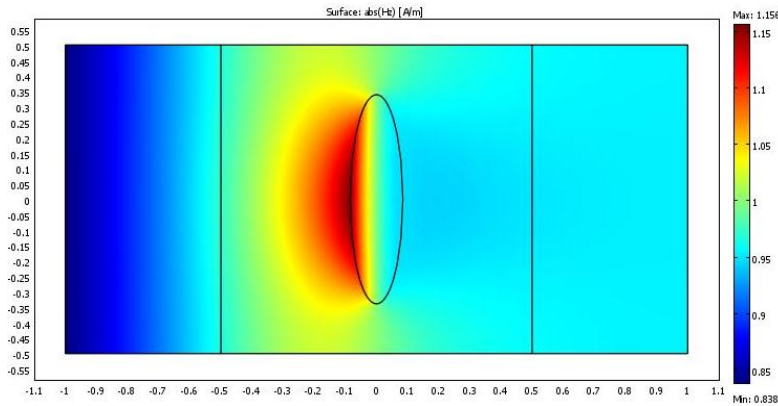
- ▶有效介质理论并不完全准确。

- ▶但是它给了我们一个大致的参照。

- ▶在下面设计隐身衣时，我们将用  
Parameter Retrieval Method，在EMT基础上，数值地获得精确的隐身衣的所需的材料尺寸。

# 3.Designing Silver Nanowires Invisible Cloak

## 3.1数值方法：Parameter Retrieval Method(PRM)



PRM uses the numerically obtained reflection and transmission coefficients to extract the effective parameters.

$$z = \pm \left[ \frac{(1+r)^2 - t^2}{(1-r)^2 - t^2} \right]^2$$

$$\cos(nkd) = \frac{1-r^2+t^2}{2t}$$

Using COMSOL MULTIPHYSICS



周期性结构单元 (cell)

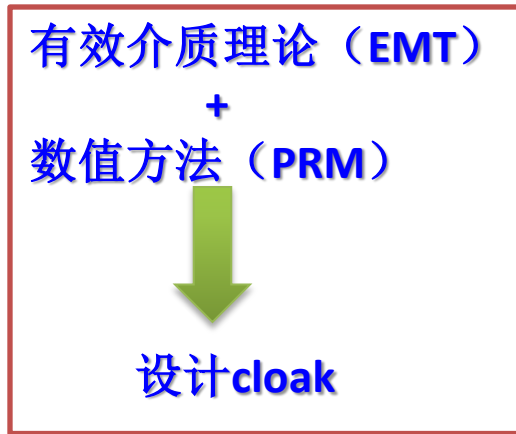
➤与EMT方法相比，通过PRM方法得到的有效介质  $\epsilon_{eff}$  更精确。但是这个方法工作量很大。

➤EMT方法可以指导我们确定  $r_x$ 、 $r_y$  和  $f$  的范围。

1.D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, *Phys. Rev. E* **71**, 036617 (2005).



## 3.2 designing process



设计的cloak:

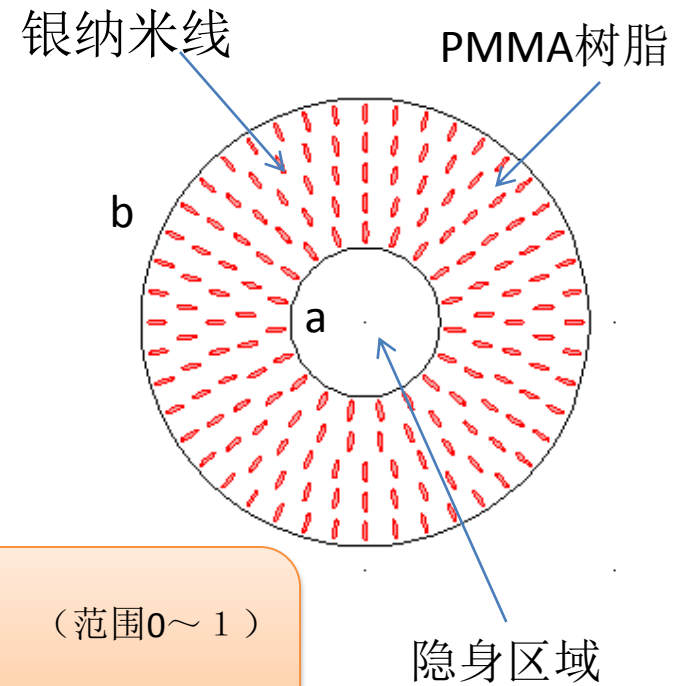
$a=150\text{nm}$ ,  $b=450\text{nm}$   
wavelength:  $451.7\text{nm}$  (2.75 eV)

材料:

Ag的介电参数:  $-7.058+0.213i$   
PMMA介电参数: 2.25

隐身衣

$$\varepsilon_r = 2.25 \left( \frac{r-a}{r} \right)^2 \quad (\text{范围} 0 \sim 1)$$
$$\varepsilon_\theta = 2.55 \quad u_z = 1$$



1.P. B. Johnson and R. W. Christy, *Phys. Rev. B* 6, 4370 (1972).  
2.M. J. Weber, *Handbook of Optical Materials* (CRC, Cleveland, 2003).

首先，我们把隐身衣的壳层分为5层（均匀但为各向异性的介质），每层的厚度为 60nm。

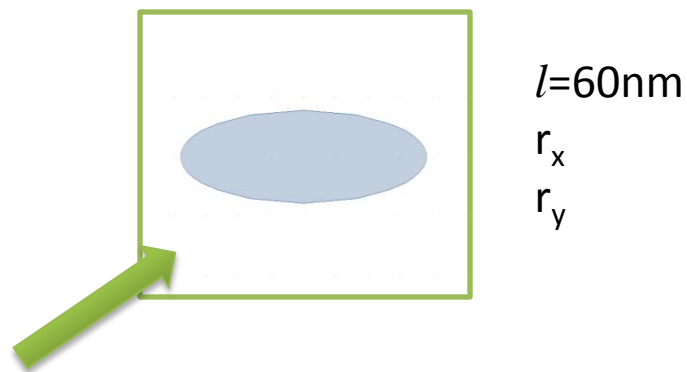
然后，每一层沿着  $\theta$  方向再均分为中心弧长为60nm的扇形（近似正方形！）单元。将椭圆截面的银纳米线放在每个单元的中心，并且主轴沿径向方向排列。用PRM方法可求得每一层的椭圆圆柱的大小，如下

### 各层的参数

层数	$r_x/\text{nm}$	$r_y/\text{nm}$	$\epsilon_r$	$\epsilon_\theta$
1	20.3	5.1	$0.172+0.115i$	$2.652+0.004i$
2	19.4	4.7	$0.344+0.109i$	$2.601+0.004i$
3	18.4	4.4	$0.527+0.102i$	$2.553+0.003i$
4	19.4	4.1	$0.798+0.072i$	$2.543+0.003i$
5	19.1	3.9	$0.933+0.064i$	$2.518+0.003i$



### Cell（近似为正方形）



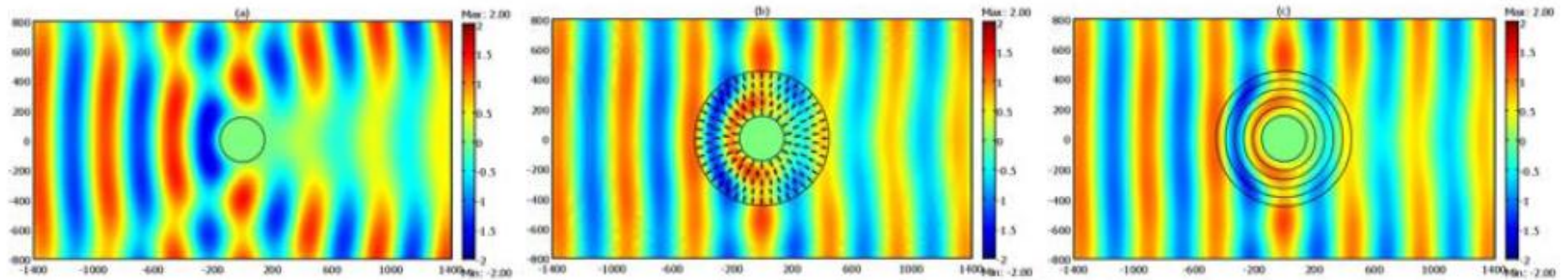


Fig. 2 The scattering patterns of (a) a bare PMC cylinder, (b) the designed cloak with silver nanowires embedded in a PMMA host, and (c) a five-layer cloak with the retrieved parameters in above table .

PMC 作为被隐身物

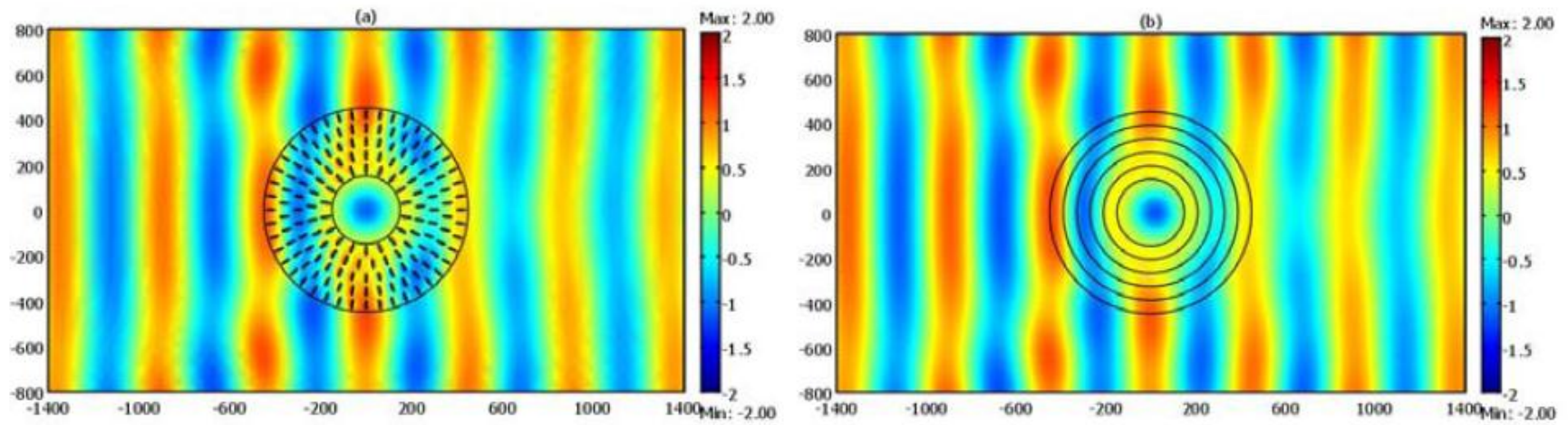


Fig. 3 The total field patterns of (a) the designed cloak and (b) the five-layer cloak interacting with an incident TM plane wave. The inner core is a PMMA cylinder.

**Dielectric** 作为被隐身物

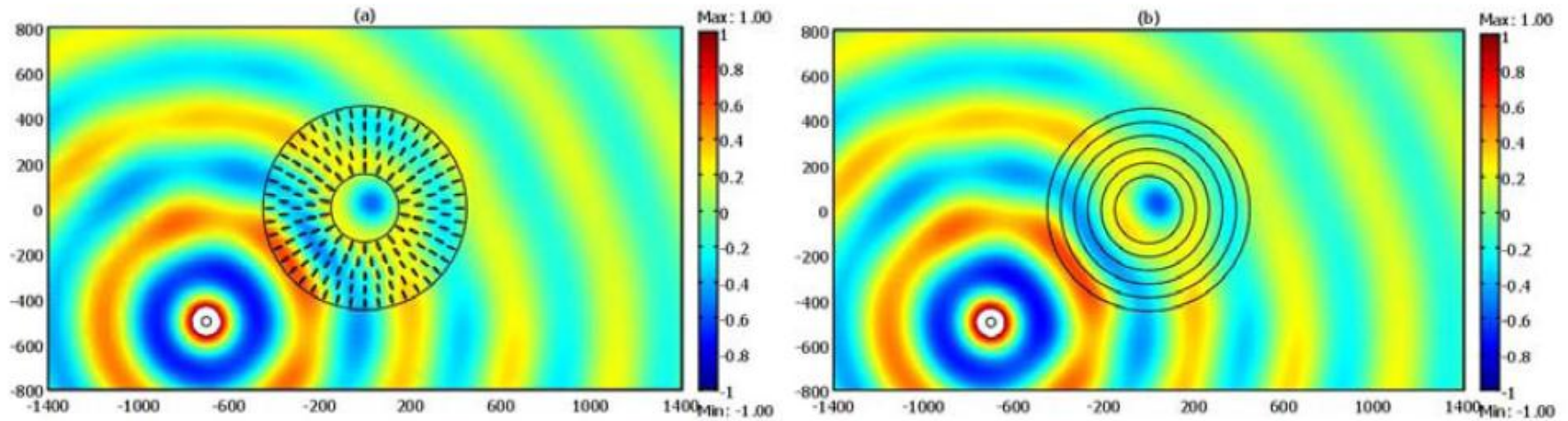
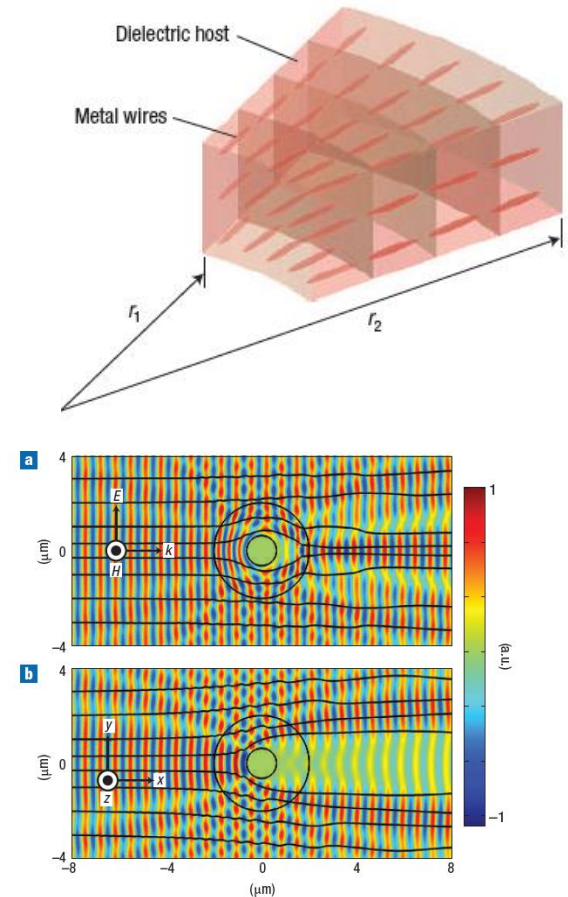


Fig. 4 The total field patterns of (a) the designed cloak and (b) the five-layer cloak interacting with a cylindrical wave. The inner core is a PMMA cylinder.

我们再试试点光源

# Advantages of our design:

1. 结构简单，制作相对容易
2. 可见光波长（451.7nm），材料常见（银和PMMA）
3. 低散射、低反射、低吸收和较小的波形扰动。
4. 可推广至其他截面（比如矩形）的金属纳米线。
5. 2D，可直接数值模拟看到隐身效果。



W. Cai, U. K. Chettiar, A.V. Kildishev, and V. M. Shalaev, *Nat. Photon.* **1**, 224 (2007).

- 我们提出了一个 **reduced cloak** 的经验公式。经检验证明，隐身效果更好。
- 我们利用有效介质理论（**EMT**）和数值方法（**PRM**），用 **silver nanowire** 和 **PMMA** 树脂设计 cloak。
- **Comsol** 在设计过程中提供了一定的数值帮助，但需不断结合解析理论。



# 我要特别感谢他们:

苏州大学 陈焕阳 教授

中山大学物理系 谢杨波 学弟  
上海交通大学物理系 祝林 学弟





# 谢谢大家!

欢迎联系我们并到本组访问:

[kenyon@ust.hk](mailto:kenyon@ust.hk)

[yadongshun@gmail.com](mailto:yadongshun@gmail.com)

主页: [www.ihome.ust.hk/~kenyon/](http://www.ihome.ust.hk/~kenyon/)