

超薄金属纳米带天线阵列的异常反射研究

胡德骄^{1*}, 庞霖¹, 杜惊雷¹

1. 四川大学, 物理学院, 一环路南一段24号, 成都市, 四川省, 610065

* darcy_h@foxmail.com

引言: 比趋肤深度还要薄的金属薄膜理应具有较高的透射率。然而, 理论和实验都表明超薄金属膜对红外光有较高的反射率。另外, 如果将薄膜变成分立的条状纳米带, 会在特定位置出现反射峰, 且对应的透射率接近于零^[1,2]。我们使用 COMSOL Multiphysics® 研究了此异常现象。

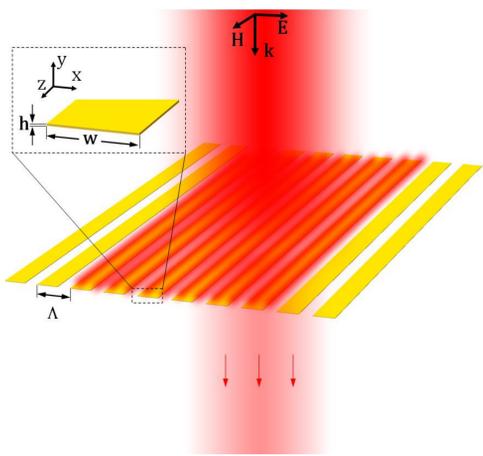


图 1. 超薄纳米带天线阵列的透射受到抑制

计算方法: 使用波动光学模块对麦克斯韦方程组进行频域求解, 得出光场、能流以及位移电流等物理量的分布情况。

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

我们对单个超薄金属纳米带的能流调控特性进行了研究。如图2所示, 将一平面横磁 (TM) 光照射到单个纳米带上 (中央蓝色区域), 并对标号为1和2的两条线做朝前和朝后传播的能流积分。我们将得出的谱线与周期性纳米带阵列的透射和反射率曲线进行了对比。

另外, 为了对比反射极大的位置与位移电流的关系, 我们使用 \arg 函数对纳米带中点的位移电流 (ewfd.Jdx) 的相位进行了提取, 并绘制成谱线。

最后, 通过分析纳米带阵列的反射率随周期的变化, 对连续超薄金属膜的反射现象进行了解释。

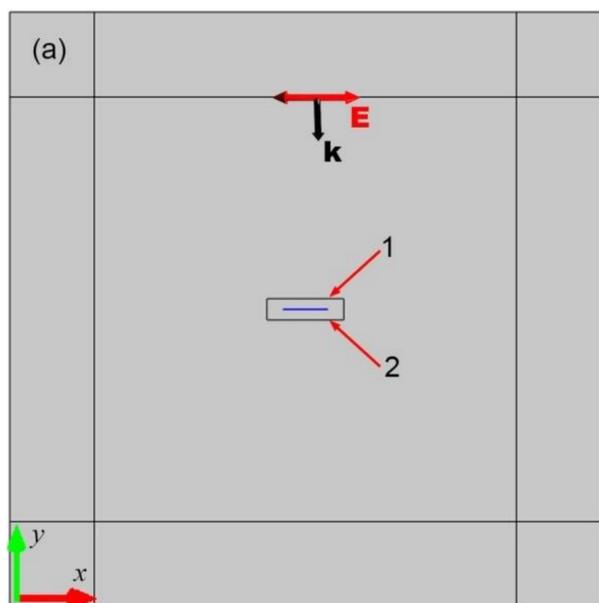


图 2. 仿真区域的几何设置以及入射光示意图

结果: 图3显示单个纳米带朝后能流 (紫线) 达到峰值的位置, 由其组成的周期阵列 (即光栅) 也达到反射率的峰值。另外, 位移电流的相位也恰好在此峰值附近与入射磁场的相位相等 (都为零)。

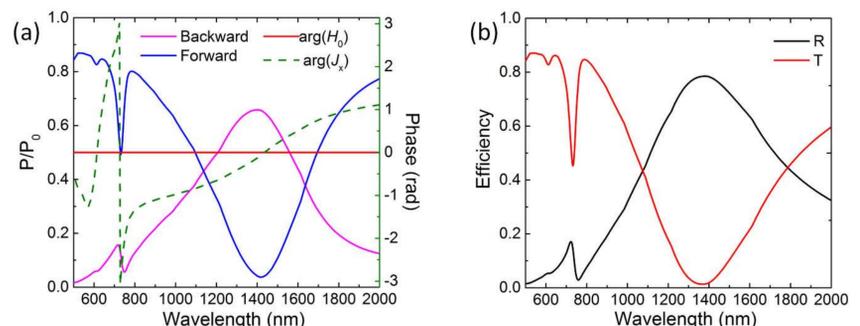


图 3. (a) 左轴: 单个纳米线朝前和朝后的能流曲线; 右轴: 纳米线中点位移电流的相位和入射光磁场分量的相位。(b) 由 (a) 中纳米带天线形成的周期阵列的反射和透射谱。

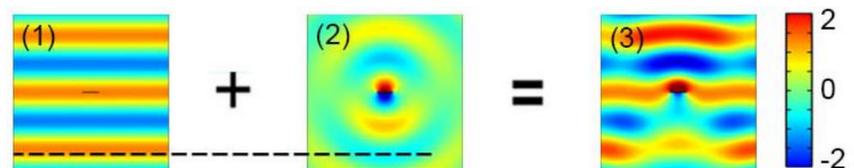


图 4. 单个纳米带带来的能流反向传播现象解释。1、2、3分别代表入射场、散射场和总场

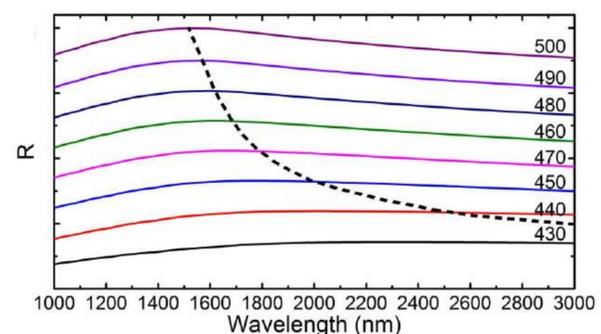


图 5. 宽 430nm 的纳米带阵列反射率随周期的变化

结论: 模拟结果表明周期阵列的异常反射来源于单个纳米带的局域表面等离子体共振。由于共振位移电流与入射磁场相位相同, 使得前向散射场相位与入射场相位相反, 导致朝前的光场干涉相消, 朝前能流受到抑制, 反射增强 (图4)。图5还表明, 连续膜在红外波段的高反射来源于这种局域共振, 只是共振频率由于宽度为无限宽而减小到零。

参考文献:

1. D. Reibold, *etal.*, "Extraordinary low transmission effects for ultra-thin patterned metal films," *Opt. Express* 17, 544-551 (2009).
2. S. Xiao *etal.*, "Nearly zero transmission through periodically modulated ultrathin metal films," *Appl. Phys. Lett.* 97, 071116 (2010).
3. D. Hu, *etal.*, "Anomalous reflection in the ultra-thin nano-strip antenna induced by incident field and displacement current phase matching," *JOSA B* 32, 1369-1376 (2015).