

波长、偏振复用全介质纳米天线

潘麦铭成, 向进, 兰胜*

信息光电子科技学院, 华南师范大学, 广东, 广州

简介:

借助光学纳米天线可以实现光学波段电磁波辐射定向性和方向性的操纵。通常而言, 定向性和方向性并不能同时兼顾。我们基于全介质纳米天线在可见光波段电偶极与磁四极模式远场辐射的干涉行为, 对光场散射角分布进行设计调节, 最终在单一结构纳米天线上实现天线辐射的超高度定向性以及方向性可调。

在此, 我们总结了纳米天线的设计规律和方法。

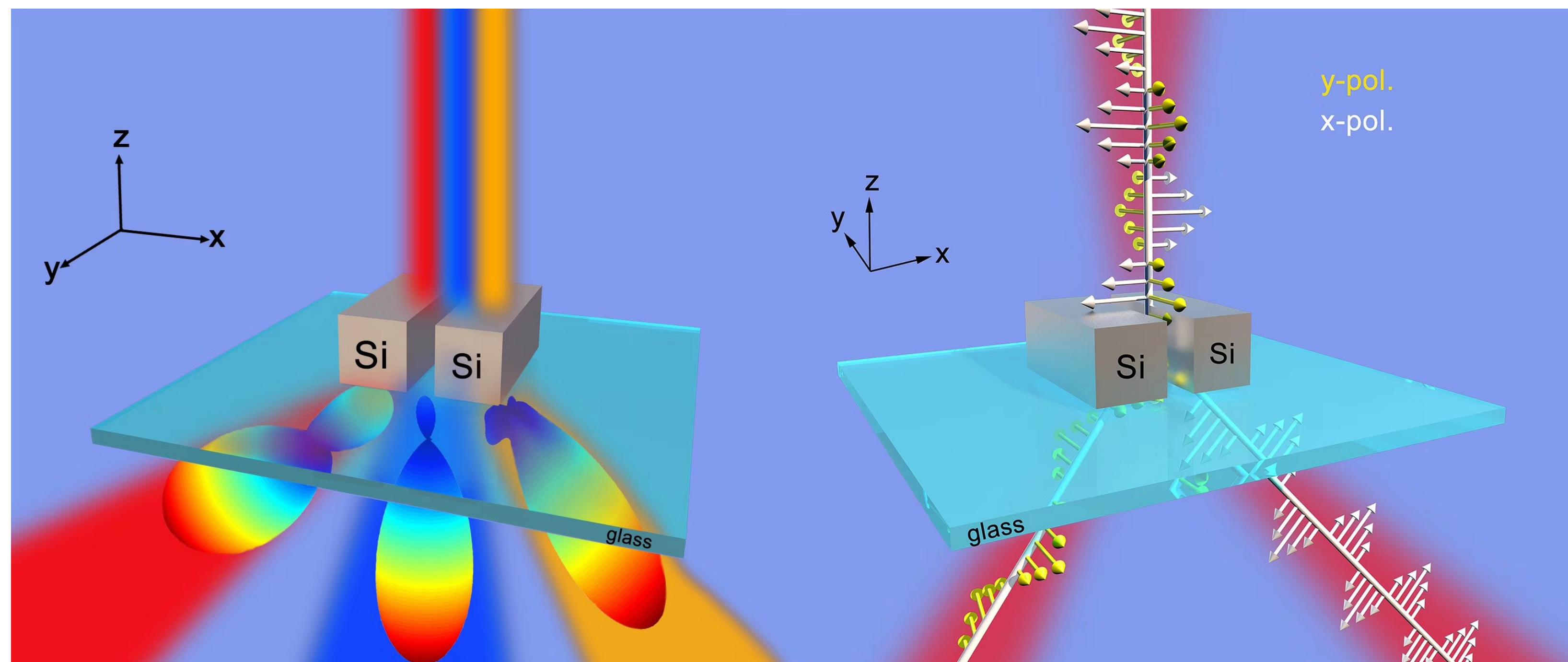


图 1. 全介质纳米天线的波长复用 (左) 和偏振复用 (右)

计算方法:

在电磁场辐射的理论中, 一个辐射体的总辐射可以分解为电偶极、磁偶极、电四极、磁四极、电八极等多偶极子远场辐射的叠加, 这一方法称为多极分解理论。

多极分解可以在两种常用坐标系中展开:

- 1、球坐标中的球谐函数展开;
- 2、直角坐标中的泰勒展开。

其中, 球坐标的多极分解方法已经收录在COMSOL的案例库中 (Application ID: 31901)。

直角坐标的泰勒展开公式如下:

$$\text{electric dipole moment: } \mathbf{P} = \frac{1}{i\omega} \int \mathbf{j} d^3r, \quad (1a)$$

$$\text{magnetic dipole moment: } \mathbf{M} = \frac{1}{2c} \int (\mathbf{r} \times \mathbf{j}) d^3r, \quad (1b)$$

$$\text{toroidal dipole moment: } \mathbf{T} = \frac{1}{10c} \int [(\mathbf{r} \cdot \mathbf{j})\mathbf{r} - 2r^2\mathbf{j}] d^3r, \quad (1c)$$

$$\text{electric quadrupole moment: } Q_{\alpha\beta} = \frac{1}{i2\omega} \int \left[r_\alpha j_\beta + r_\beta j_\alpha - \frac{2}{3}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{j})\delta_{\alpha\beta} \right] d^3r, \quad (1d)$$

$$\text{magnetic quadrupole moment: } M_{\alpha\beta} = \frac{1}{3c} \int [(\mathbf{r} \times \mathbf{j})_\alpha r_\beta + (\mathbf{r} \times \mathbf{j})_\beta r_\alpha] d^3r, \quad (1e)$$

通过求解位移电流 \mathbf{J} , 可以计算得出相应的多偶极矩。

$$I = \frac{2\omega^4}{3c^3} |P|^2 + \frac{2\omega^4}{3c^3} |M|^2 + \frac{4\omega^5}{3c^4} (\mathbf{P} \cdot \mathbf{T}) + \frac{2\omega^6}{3c^5} |T|^2 + \frac{\omega^6}{5c^5} \sum |Q_{\alpha\beta}|^2 + \frac{\omega^6}{40c^5} \sum |M_{\alpha\beta}|^2 + O\left(\frac{1}{c^5}\right), \quad (2)$$

通过求解多偶极矩, 可以计算得出辐射体的辐射功率。

结果:

单个硅块纳米天线可以同时支持电偶极、磁偶极和磁四极模式。在非对称硅块纳米天线利用电偶极的 ED_x 、 ED_z 分量与磁偶极 MD_y 分量之间的干涉调节辐射方向性; 利用电偶极 ED_x 分量与磁四极 MQ_{yz} 分量或者磁偶极 MD_y 分量、电四极 EQ_{yz} 分量之间的干涉调节辐射定向性。最终实现散射电磁波方向性和定向性的同时调节。

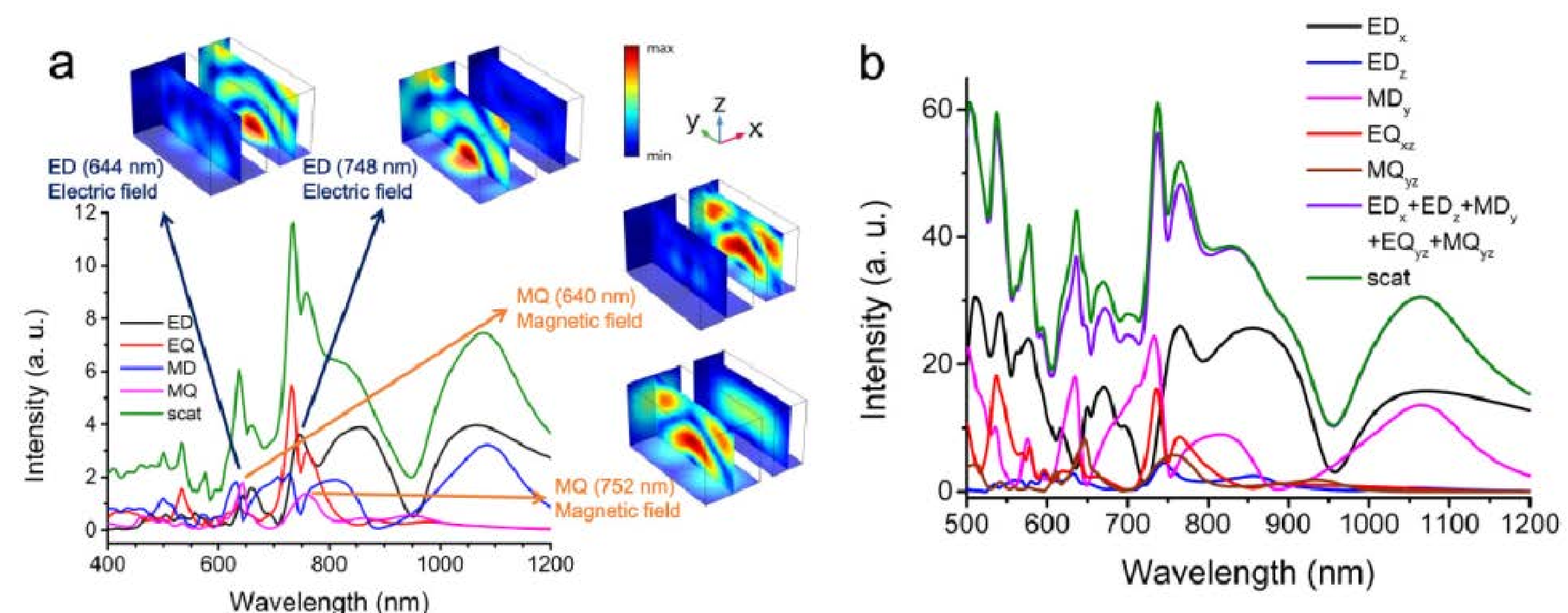


图 2. 非对称硅块纳米天线远场辐射在(a)球坐标和(b)直角坐标的多极分解展开

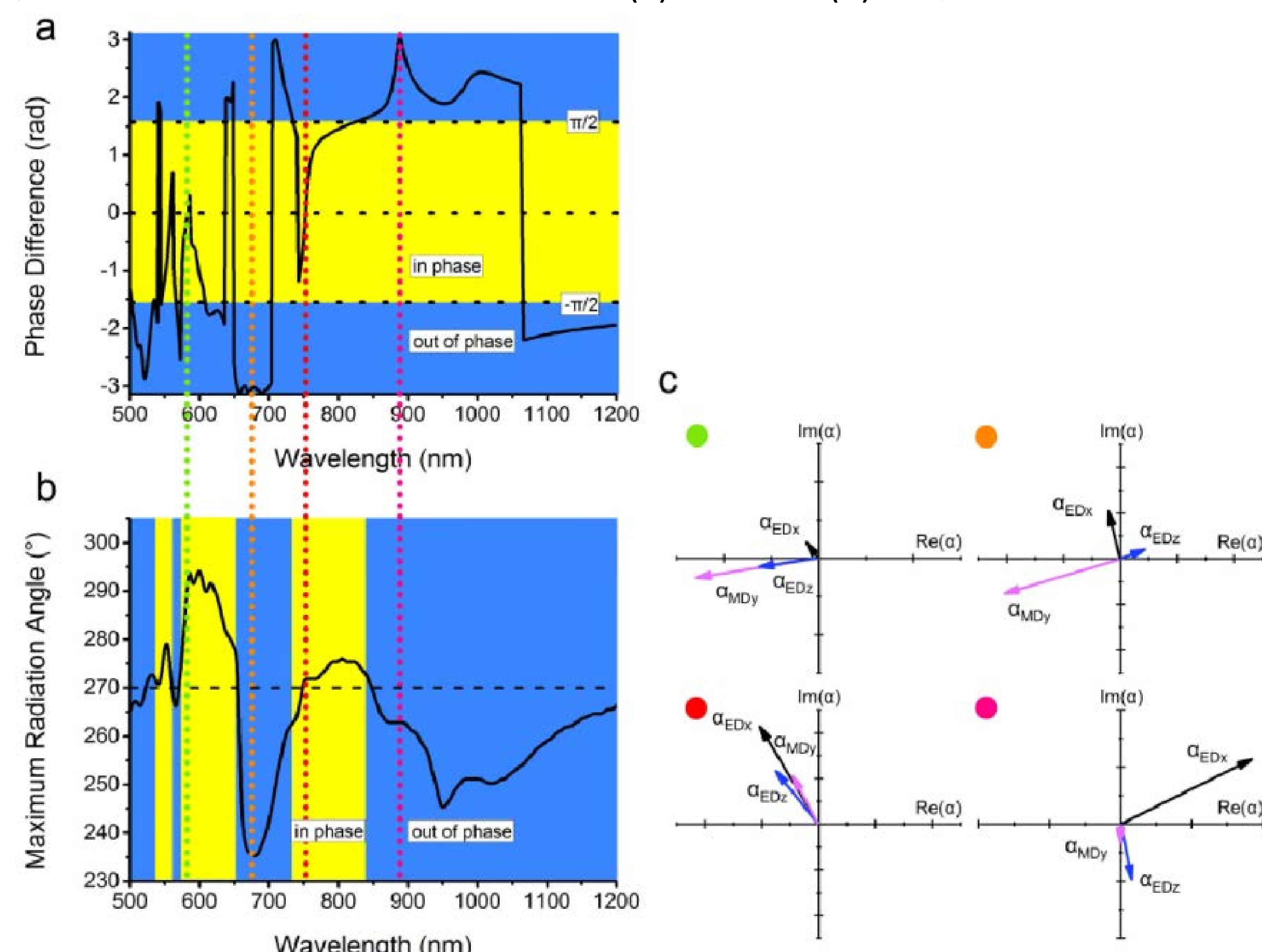


图 3. 电偶极 ED_z 分量与磁偶极 MD_y 分量之间的相位差与辐射最大偏转角的关系

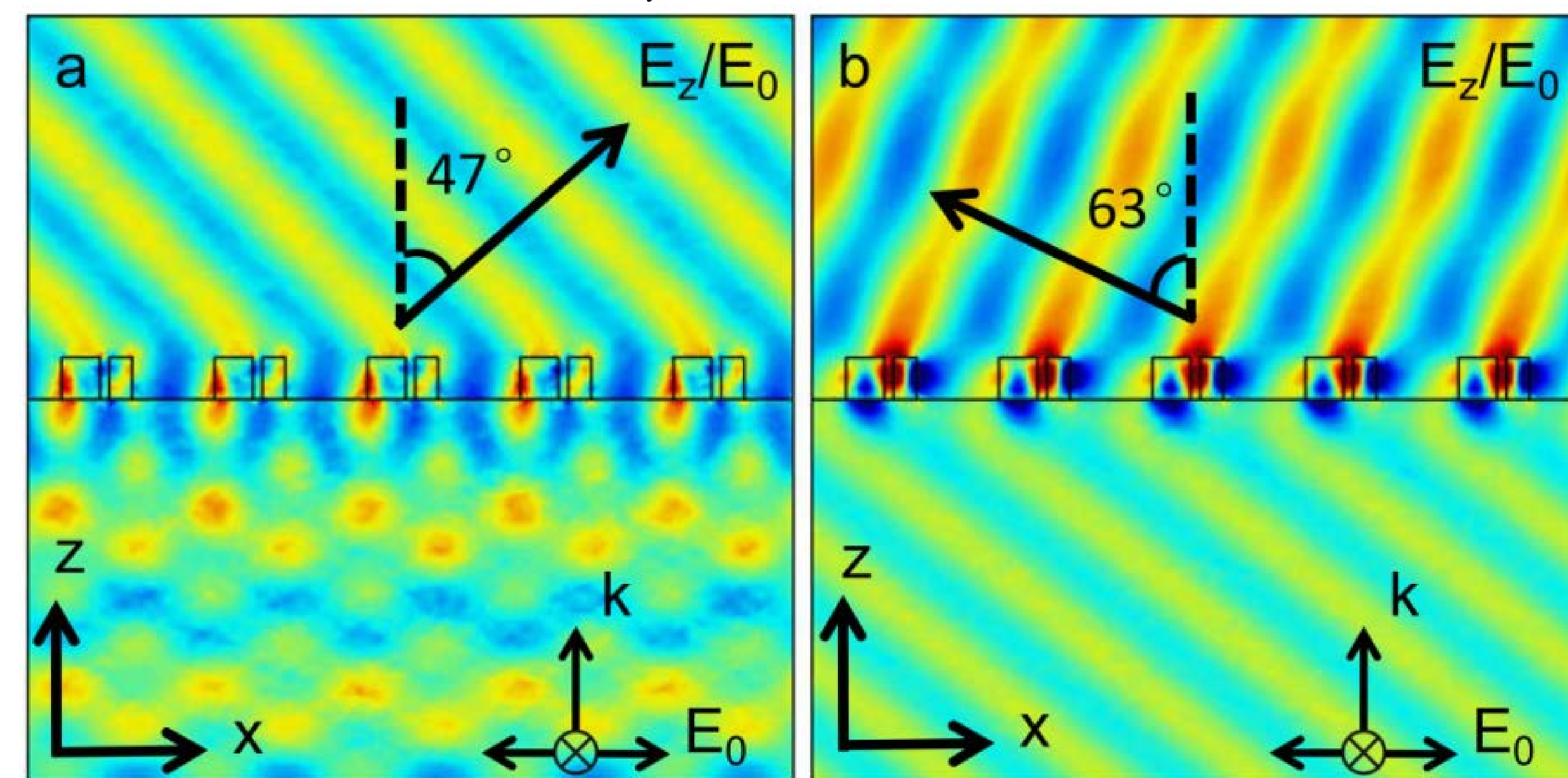


图 4. 非对称硅块纳米天线阵列实现光束的偏转

结论:

该纳米天线可以有效实现波长与偏振的复用。并在将来应用于高效率光探测器、光传感器以及片上集成光互联技术中。

参考文献:

1. M.C.Panmai *et al.*, All-silicon-based nano-antennas for wavelength and polarization demultiplexing, *Optics Express*, 26 (10), 12344-12362 (2018)