



非对称共轴腔结构色产生与调控

钱其升 刘慧研 查永鹏 倪海彬

Generation and control of structural color in asymmetric coaxial cavity

Qian Qi-Sheng Liu Hui-Yan Zha Yong-Peng Ni Hai-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 084103 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211337

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211337>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

旋转对称表面等离激元结构中极端局域光场的准正则模式分析

Quasinormal mode analysis of extremely localized optical field in body-of-revolution plasmonic structures

物理学报. 2019, 68(14): 147104 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190434>

基于人工表面等离激元结构的全向隐身

Omnidirectional cloaking based on spoof surface plasmonic structure

物理学报. 2019, 68(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190283>

多能场复合电沉积对 Al_2O_3 -Co复合薄膜物性影响研究

Effects of multi-energy field electrodeposition on properties of Al_2O_3 -Co composite films

物理学报. 2022, 71(1): 017801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211313>

拓扑表面等离激元

Topological surface plasmon polaritons

物理学报. 2019, 68(22): 224101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191085>

表面等离激元传播的调制

Modulation of propagating surface plasmons

物理学报. 2019, 68(14): 147302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190802>

开口狭缝调制的耦合微腔中表面等离激元诱导透明特性

Surface plasmon induced transparency in coupled microcavities assisted by slits

物理学报. 2020, 69(13): 134205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200369>

非对称共轴腔结构色产生与调控*

钱其升¹⁾ 刘慧研¹⁾ 查永鹏¹⁾ 倪海彬^{1)2)†}

1) (南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

2) (江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

(2021年7月20日收到; 2021年11月21日收到修改稿)

金属纳米结构应用于产生和调控结构色有巨大的潜力. 本文设计了一种基于银纳米非对称共轴腔的阵列结构, 研究环形腔在非对称情况下对于结构色产生和调控的影响, 通过时域有限差分的方法对非对称共轴腔有序阵列进行仿真计算, 得到了结构几何参数对结构色的影响. 结果表明, 调节共轴腔深度、开口大小和厚度都能产生丰富的结构色. 实验与仿真结果基本一致. 相比对称式结构的共轴腔, 本文提出的非对称金属纳米结构在颜色显示方面具有更好的可调性, 在彩色成像、高分辨率成像、防伪等方面有潜在应用.

关键词: 圆柱形表面等离子激元, 结构色, 非对称共轴腔**PACS:** 41.20.-q, 61.46.-w, 42.25.Gy**DOI:** 10.7498/aps.71.20211337

1 引言

人类社会应用的色彩来源于矿物质、植物或动物色素以及人工合成, 现代生活更多地采用合成染料, 然而染料分子在高温或紫外线照射下不易保存, 还存在环境污染问题. 结构色在大自然中广泛存在, 例如鸟类羽毛^[1,2]、昆虫翅膀^[3,4]等, 结构色相比传统染料色彩具有寿命长^[5]、无污染、极限分辨率高等优点. 人类社会对结构色的研究利用仍处于初步阶段, 近年来有大量相关的报道, 其中基于表面等离子激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 的一类结构色因可制备突破衍射极限的光子调控结构引起了广泛的关注和研究, 例如 MIM (metal/insulator/metal) 多层结构^[6]、表面有序孔洞结构^[7,8]等. 有报道称同轴金纳米管阵列结构^[9]可以使得共振波长的位置在较大光谱范围内可调控, 实现 CMY (cyan-magenta-yellow) 和 RGB (red-green-blue) 色彩, 反射颜色在大角度范围内对角度不敏

感, 并且可以实现突破衍射极限的像素尺寸. 但现阶段的研究仅局限于对称结构, 对非对称结构方面的研究有所欠缺, 因此本文着重研究非对称条件下共轴纳米腔的光学和色彩特性.

本文创新地研究了一种非对称的纳米共轴腔结构的色彩显示特性. 通过时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 研究光谱和色彩对结构非对称性的依赖关系, 分析该结构的反射谱和共振波长对应的截面电场分布的仿真结果, 阐述了非对称结构产生结构色激发的光学模式. 实验和仿真计算表明, 非对称共轴腔可显示大部分明亮的颜色, 可潜力应用于防伪、高分辨成像、超清彩色显示等.

2 结构设计与光学特性分析

2.1 结构设计

非对称共轴腔有序阵列周期结构如图 1(a) 所示, 剖面如图 1(b) 所示. 由 PS 衬底层和银层上周

* 国家自然科学基金 (批准号: 61605082, 61875089)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20160969)、江苏省高等学校重点学科建设项目 (PAPD)、中国博士后科学基金 (批准号: 2017M611654) 和江苏省博士后科研基金 (批准号: 1701074B) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: nihaibin@nuist.edu.cn

期性排列的非对称共轴腔组成. 采用基于 FDTD 算法的商业软件对结构的光学特性进行研究. 将仿真区域的 x 方向与 y 方向设置为周期边界条件, z 方向设置为完美匹配层 (PML). 平面光源沿 z 轴负方向入射, 网格大小 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 均设为 2 nm.

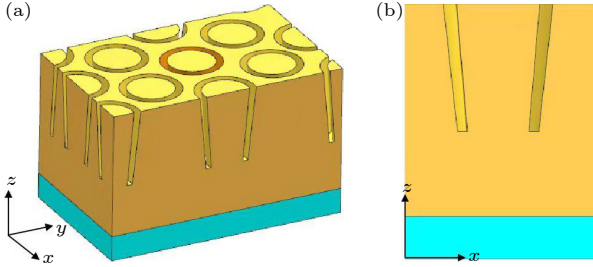


图 1 模型结构示意图 (a) 三维图; (b) 剖面图
Fig. 1. Model structure diagram: (a) Three dimensional diagram; (b) section diagram.

2.2 结构光学特性分析

取一组 $H = 150$ nm, $R = 55$ nm, $r = 35$ nm, $d = 10$ nm, $P = 250$ nm 的结构参数. 利用 FDTD

算法仿真研究非对称共轴腔的光学特性, 得到图 2(b) 所示的模型的反射谱、透射谱及吸收谱, 反射光谱在可见光波段形成位于 $\lambda_1 = 490$ nm, $\lambda_2 = 610$ nm 等多个反射谷. 为说明各个谐振的内在物理机理, 得到各个反射谱波谷对应波长的截面电场分布图, 结果如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 共振发生在非对称结构的空气腔内. 根据波动理论和计算所得截面电场分布图的分析, 纳米管腔上下界面可以形成满足横电波 TE (transverse electric) 波导模式边界条件的法布里-珀罗 F-P (Fabry-Perot) 腔共振模式, 另外在腔内外表面圆周方向可以存在满足谐振条件的模式, 同时满足上述两个条件的模式, 即圆柱形表面等离激元 CSPs [10], 该模式计算公式如下 [11–13]:

$$|2LK_{\text{SPP}}(\omega) + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2| = 2\pi m, \quad (1)$$

$$2rK_{\text{SPP}} = 2\pi n, \quad (2)$$

$$2(R-r)K_{\text{SPP}} = 2p, \quad (3)$$

式中, L 为纳米管腔的深度; $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 分别非对称共轴腔有序阵列结构上下界面光波的相位变化,

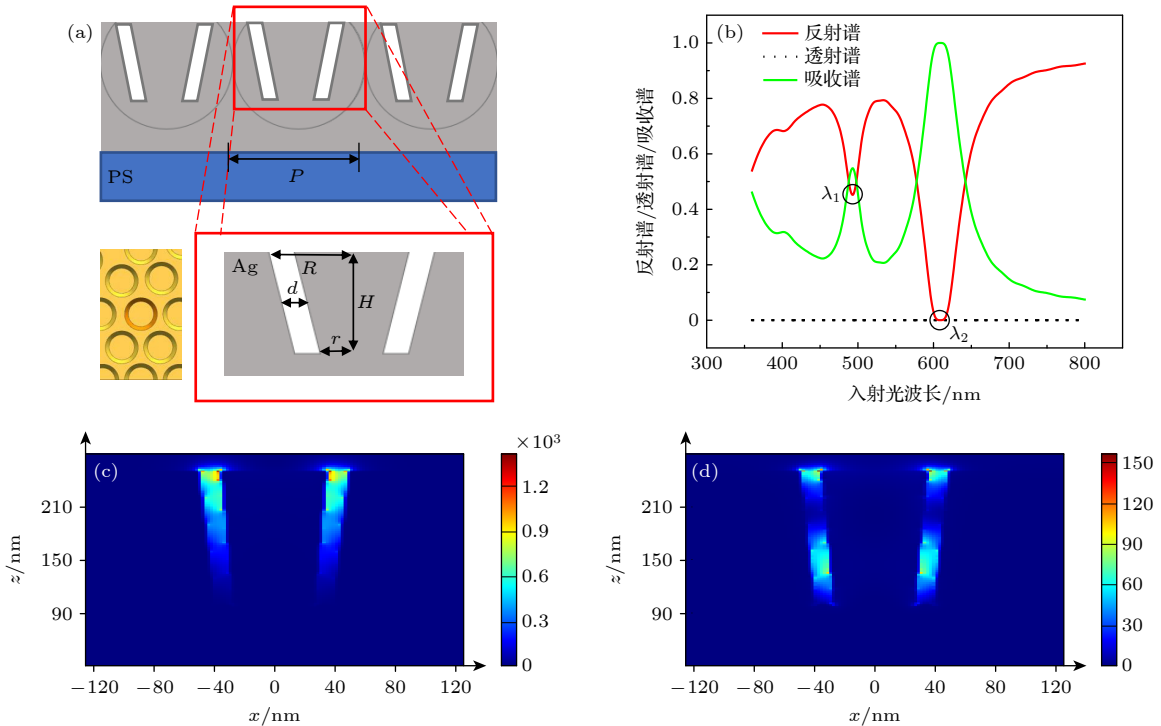


图 2 结构与仿真结果 (a) 具有指定几何参数的同轴纳米腔的结构参数示意图; (b) 当单个非对称共轴腔的结构参数为 $H = 150$ nm, $R = 55$ nm, $r = 35$ nm, $d = 10$ nm, $P = 250$ nm 的反射、透射、吸收光谱图; (c) $\lambda_1 = 490$ nm 和 (d) $\lambda_2 = 610$ nm 共振波长处竖直截面的电场分布图

Fig. 2. Structure and simulation: (a) Single interface diagram of coaxial nano-cavity with specified geometric parameters; (b) reflection, transmission and absorption spectra of a single asymmetric coaxial cavity with $H = 150$ nm, $R = 55$ nm, $r = 35$ nm, $d = 10$ nm, $P = 250$ nm; cross section electric field distributions at (c) $\lambda_1 = 490$ and (d) $\lambda_2 = 610$ nm resonance wavelengths.

且 SPPs 在界面处的相位的的变化在 $0-2\pi$ 之间, 与模式在波导中的等效折射率相关; $K_{\text{SPP}}(\omega)$ 为对应共振波长的频率 ω 的波矢量; m, n, p 表示同轴腔中的模式阶数. 由 (1) 式可知, 波长为 490 和 610 nm 等特定频率的光在垂直和水平方向上满足 F-P 模式的相位匹配条件, 同时也符合波导在环形腔的边界条件. 在共振条件下, 由于金属中的损耗, 特定波长的光被强烈吸收, 结构反射光谱中出现明显的反射下降 (反射谷), 使得结构呈现出相应的结构色. 通过改变结构的各个参数, 实现整个可见光范围内对反射颜色的控制, 对于设计参数, 着色主要由 g-CSP 模式定义, 以确保显示的彩色在较大入射角度范围内不变.

3 结果与讨论

3.1 实验结果

实验制备的非对称共轴腔阵列结构如图 3(a) 所示, 共轴腔截面 SEM 图如图 3(b) 所示 (非对称结构开口的方向不影响其颜色调控能力). 以自组装的有序聚苯乙烯 (PS) 微球/SiO₂ 复合结构阵列为衬底, 通过反应离子刻蚀法选择性刻蚀 PS 微球的形貌, 结合磁控溅射镀膜形成一系列纳米环形腔阵列, 并采用离子束刻蚀的方法形成非对称的环形

腔结构. 通过改变刻蚀时间控制共轴腔的深度 H , 以此实现不同颜色的显示. 在光学显微镜下观察到结构显示了红、紫、蓝、绿等多种颜色, 如图 3(c) 所示. 图 3(d)–(f) 给出了图 3(c) 中紫色区域 1、红色区域 2 和绿色区域 3 的实验和仿真光谱图像对比 (图中标注的 3 种颜色都是仿真 CIE 产生的颜色). 受传输型 SPP 影响, 实验和仿真结果中波谷位置有一定的偏差, 但产生的颜色整体符合度较高. 本文主要研究与 g-CSP 模式相关的 $\lambda_1 = 490$ nm 和 $\lambda_2 = 610$ nm 两个反射谷的变化情况, 通过仿真研究不同结构参数模型, 分析其光学性质不同的原因, 结构参数包括共轴腔深度 H 、共轴腔上外半径 R 和共轴腔厚度 d .

3.2 结构参数对结构色的调控

3.2.1 非对称共轴腔深度 H 对反射率及结构色调控

改变腔深度 H , 能够得到变化的颜色 (图 4(a)), 对应的反射光谱图如图 4(b) 所示. H 变化等效竖直方向上纳米腔深度的改变, 入射光在腔高度方向发生 F-P 共振. 从图 4(c) 可以看出, 随着 H 的增加 K_{SPP} 减少, 对应的 λ_2 反射谷发生红移. 通过软件仿真反射光谱并计算其颜色, 可以看到黄、棕、红、紫、绿等多种颜色, 图 4(d) 给出与 H 变化相对

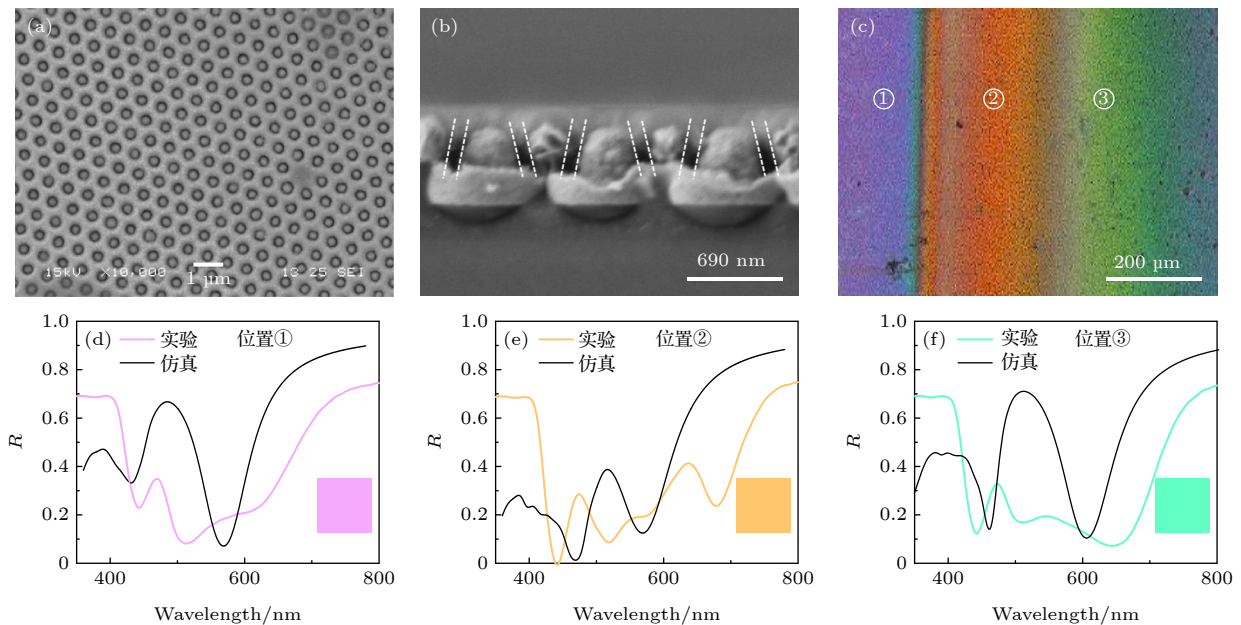


图 3 实验图 (a) 共轴腔结构 SEM 俯视图; (b) 共轴腔结构截面 SEM 图; (c) 结构色显微镜图; (d)–(f) 实验与仿真反射光谱对照图
 Fig. 3. SEM image of (a) coaxial cavity arrays and (b) cross section of coaxial cavities; (c) optical microscope image of coaxial cavity arrays with different structure parameters; (d)–(f) comparison between experiments and simulation results.

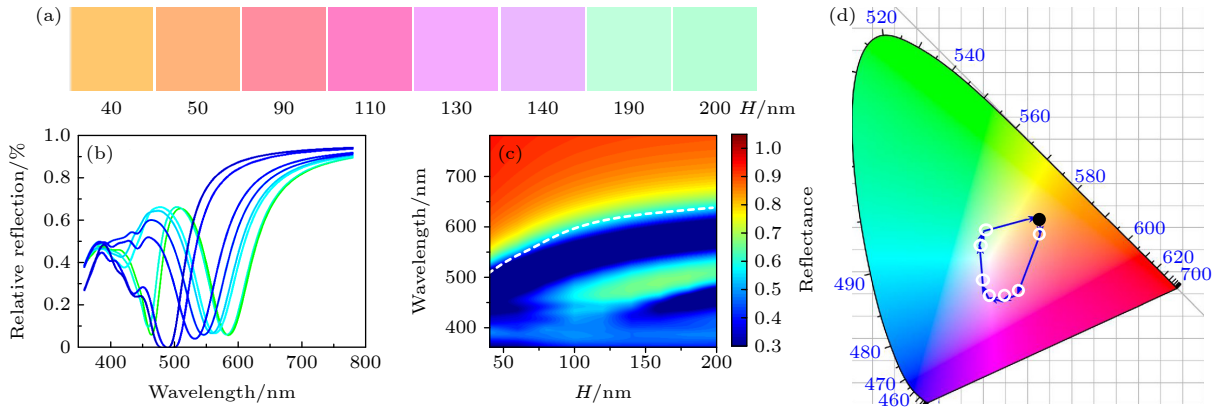


图 4 结构色及光谱图 (a) $R = 75 \text{ nm}$, $r = 35 \text{ nm}$, $d = 30 \text{ nm}$, $P = 250 \text{ nm}$ 时, 共轴腔深度 H 从 40 nm 增加到 200 nm 时结构色的变化; (b), (c) 不同共轴腔深度 H 时的反射光谱; (d) 与深度 H 变化对应的颜色变化路径图

Fig. 4. Structural color and reflectance spectrum comparison diagram: (a) When $R = 75 \text{ nm}$, $r = 35 \text{ nm}$, $d = 30 \text{ nm}$, $P = 250 \text{ nm}$, the structural color changes when the coaxial cavity depth H increases from 40 nm to 200 nm ; (b), (c) reflection spectra at different coaxial cavity depths H ; (d) trace of displayed colors as H varies.

应的颜色变化路径图 (黑色实心圆点表示仿真起始点), 结果表明结构变量 H 对于结构色有明显的调控能力, 能够覆盖主要色域。

3.2.2 非对称共轴腔上外半径 R 对反射率及结构色的调控

改变上外半径 R , 得到图 5(a) 所示绿色、淡黄色、红色等多种颜色, 及其对应的反射光谱图 (图 5(b)). 保持 r 不变, 随着 R 的改变, 共轴腔的开口逐渐增大, 使得管腔两个圆周曲面各自形成的 SPPs 发生不同程度的耦合, 导致满足 TE 波导模式的边界条件发生变化, 从而改变共振波长, λ_1 和 λ_2 的反射谷随 R 增加持续红移 (图 5(c)). 调节上外半径 R 引起结构色沿图 5(d) 所示路径移动 (黑色实心

圆点表示仿真起始点), 表明非对称结构一侧开口半径变化对显示的结构色有较大调节能力。

3.2.3 非对称共轴腔厚度 d 对反射率及结构色的调控

改变厚度 d , 得到如图 6(b) 所示的反射光谱图. 保持 r 不变, 改变 d 的大小使得相邻结构管之间的距离发生了均匀变化, 随着管腔之间的距离越来越大, 管腔之间的耦合程度也就越低, 从而导致满足 TE 波导模式的边界条件发生变化, 进而改变共振波长, 从图 6(c) 可以看出, λ_1 和 λ_2 的反射谷不断蓝移. 如图 6(d) 对应的颜色路径变化图 (黑色圆心原点表示仿真起始点), 显示出淡紫色、绿色、粉红色等多种颜色。

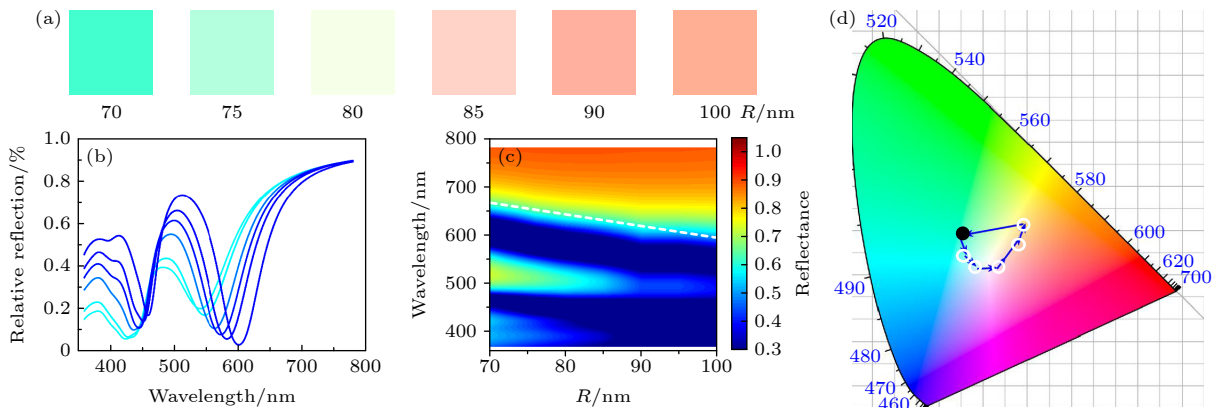


图 5 结构色及光谱对比图 (a) $H = 150 \text{ nm}$, $r = 35 \text{ nm}$, $P = 250 \text{ nm}$ 时, 共轴腔上外半径 R 在 $70\text{--}100 \text{ nm}$ 范围内的结构色显示图; (b) 不同共轴腔上外半径的反射谱图; (c) 共轴腔上外半径 R 的对比反射光谱图; (d) 上外半径 R 对应的颜色路径图

Fig. 5. Structural color and spectrum contrast diagram: (a) Structural color display diagram of coaxial cavity with outer radius R from 70 to 100 nm ; (b) reflection spectrums of different coaxial cavity depths; (c) contrast reflection spectra of outer radius R in coaxial cavity; (d) color path corresponding to upper outer radius R .

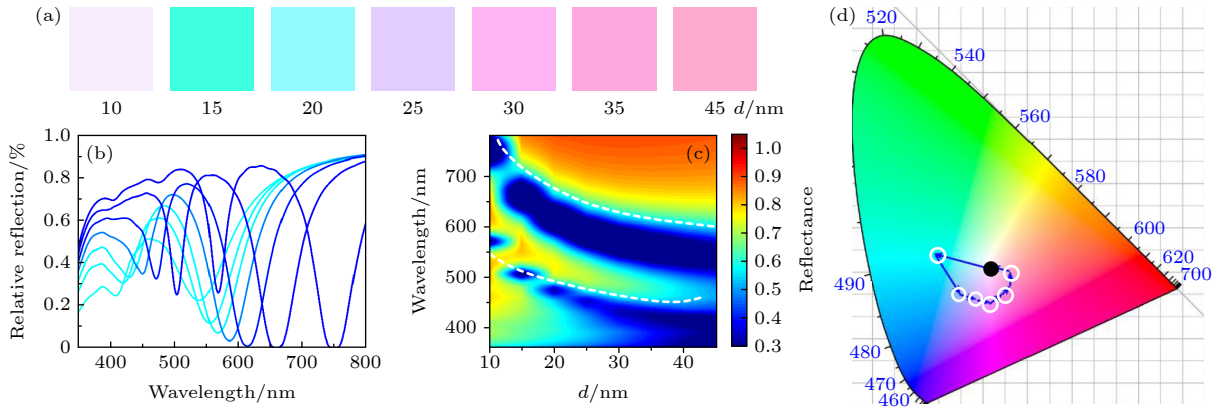


图6 结构色及光谱对比图 (a) $H = 150 \text{ nm}$, $r = 35 \text{ nm}$, $P = 250 \text{ nm}$ 时, 共轴腔厚度 d 在 $10\text{--}45 \text{ nm}$ 范围内的结构色显示图; (b) 不同共轴腔厚度的反射谱图; (c) 共轴腔厚度 d 的对比反射光谱图; (d) 厚度 d 对应的颜色路径图

Fig. 6. Structural color and spectrum comparison diagram: (a) When $H = 150 \text{ nm}$, $R = 55 \text{ nm}$, $r = 35 \text{ nm}$, $P = 250 \text{ nm}$, the structure color display diagram of coaxial cavity thickness d from $10\text{--}45 \text{ nm}$; (b) reflection spectrums of different coaxial cavity depths; (c) contrast reflection spectrogram of coaxial cavity thickness d ; (d) color path corresponding to thickness d .

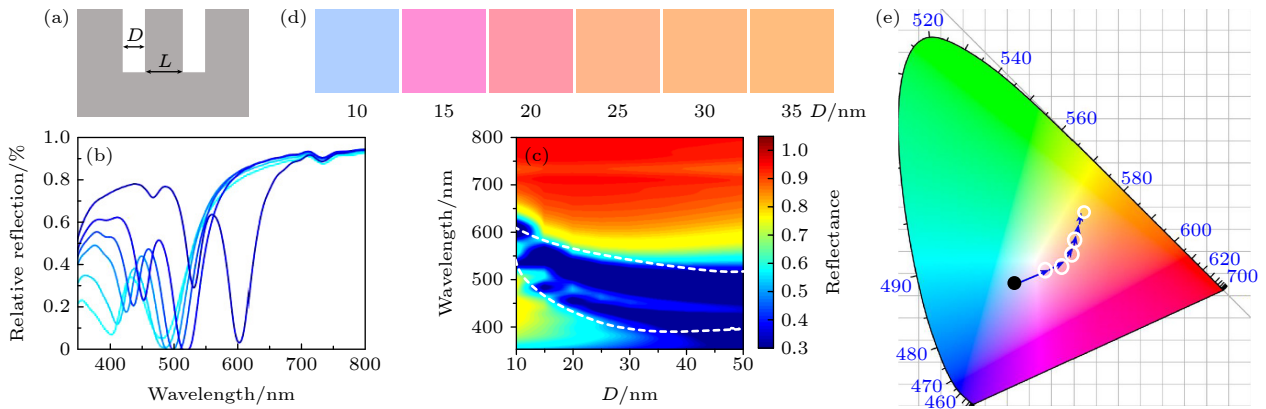


图7 结构色及光谱对比图 (a) 对称结构截面图; (b) $H = 200 \text{ nm}$, $L = 60 \text{ nm}$, $P = 250 \text{ nm}$ 时, 共轴腔厚度 D 从 $10\text{--}35 \text{ nm}$ 的结构色显示图; (c) 不同共轴腔厚度的反射谱图; (d) 共轴腔厚度 D 的对比反射光谱图; (e) 厚度 D 对应的颜色路径图

Fig. 7. Structural color and spectrum comparison diagram: (a) When $H = 200 \text{ nm}$, $L = 60 \text{ nm}$, $P = 250 \text{ nm}$, the structure color display diagram of coaxial cavity thickness d from $10\text{--}35 \text{ nm}$; (b) structural color display diagram of coaxial cavity thickness D from 10 to 35 nm ; (c) reflection spectrums of different coaxial cavity depths; (d) contrast reflection spectrogram of coaxial cavity thickness D ; (e) color path corresponding to thickness D .

3.3 非对称结构与对称结构的比较

尽管相对称结构, 非对称结构在制备方法上更困难, 但通过 FDTD 仿真计算发现: i) 非对称共轴腔结构的结构参数可调性更高 (可调节上下开口 R , r); ii) 在同样金属膜厚度条件下, 非对称腔的倾斜腔长度比对称竖直腔长度大, 因此非对称腔可以在较薄的膜厚范围内实现更多的色彩显示; iii) 非对称共轴腔对颜色的调控能力优于对称共轴腔, 能覆盖更大面积的色域. 以腔厚度为例, 图 7(a) 所示是对称结构的截面图, 通过改变共轴腔的厚度 D , 得到如图 7(b) 所示的反射光谱图. 随着管腔之间的距离 D 越来越大, 管腔之间的耦合程度也

就越低, 从而导致满足 TE 波导模式的边界条件发生变化, 进而改变共振波长, 如图 7(e) 颜色路径变化图 (黑色实心原点表示仿真起始点), 显示出淡蓝色、粉红色等颜色. 对比图 6(d) 可以看出, 与非对称结构相比, 对称共轴腔产生的结构色覆盖区域较小.

4 结论

本文设计了一种非对称的共轴纳米腔有序阵列结构, 改变结构参数以分析非对称对于共轴腔在结构色的产生和调控的影响. 仿真及实验发现, 调整共轴腔深度、开口大小和厚度可以显示出明显的

颜色变化. 结构产生的颜色包括了红、绿、蓝等整个可见光的大部分明亮色域, 展现了非对称结构应用于彩色显示的潜力, 这对于高分辨显示^[14]、生物医学成像^[15]、高密度信息存储^[16]、图像加密^[17]、超材料多波段滤波器^[18]的设计及未来无线通信领域滤波^[19]方面的设计有着指导性意义.

参考文献

- [1] Kolle M, Pedro M S, Maik R J S 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 511
- [2] Noh H, Liew S F, Saranathan V 2010 *Adv. Mater.* **22** 2871
- [3] Rassart M, Simonis P, Bay A 2009 *Phys. Rev. E* **80** 031910
- [4] Parker A R, Welch V L, Driver D 2003 *Nature* **426** 786
- [5] Roberts A S, Pors A, Albrektsen O, Bozhevolnyi S I 2014 *Nano Lett.* **14** 783
- [6] VarPhilips R W, Bleikolm A F 1996 *Appl. Opt.* **35** 5529
- [7] Liu X Y, Zhu S M, Zhang D 2010 *Mater. Lett.* **64** 2745
- [8] Guo D Z, Hou S M, Xue Z Q 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 385
- [9] Cheng J X, Zhou Y, Chang J H, Ni H B 2021 *Study on Optical Communications* **47** 41 (in Chinese) [成建新, 周盈, 常建华, 倪海彬 2021 光通信研究与应用 **47** 41]
- [10] Murphy A, Sonnefraud Y, Krasavin A V, Ginzburg P, Morgan F, McPhillips J, Wurtz G, Maier S A, Zayats A V, Pollard R 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 103103
- [11] Dong Z, Ho J, Yu Y F, Fu Y H, Paniagua-Dominguez R, Wang S, Kuznetsov A I, Yang J K W 2017 *Nano Lett.* **17** 7620
- [12] Vandehaar M A, Maas R, Brenny B, Polman A 2016 *New J. Phys.* **18** 043016
- [13] Ni H B, Wang M, Shen T, Zhou J 2015 *ACS Nano* **9** 1913
- [14] Dai Q, Fu R, Deng L G, Li J X, Zheng G X 2019 *Appl. Opt.* **40** 1045 (in Chinese) [戴琦, 付饶, 邓联贵, 李嘉鑫, 郑国兴 2019 应用光学 **40** 1045]
- [15] Yang Y, Wang J Y, Zhao M, Cui D Z 2019 *Prog Chem.* **31** 1007 (in Chinese) [杨悦, 王珏玉, 赵敏, 崔岱宗 2019 化学进展 **31** 1007]
- [16] Karmakar S, Behera D 2019 *Ceram. Int.* **45** 237
- [17] Abdolahi M, Jiang H, Kaminska B 2019 *Nat. Nanotechnol.* **30** 405301
- [18] Zhong M, Shi X C 2020 *J. Infrared Millimeter* **39** 576 (in Chinese) [钟敏, 史先春 2020 红外与毫米波学报 **39** 576]
- [19] Zhang H C, He P H, Niu L Y, Zhang L P, Cui T J 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 372 (in Chinese) [张浩驰, 何沛航, 牛凌云, 张乐鹏, 崔铁军 2021 光学学报 **41** 372]

Generation and control of structural color in asymmetric coaxial cavity*

Qian Qi-Sheng¹⁾ Liu Hui-Yan¹⁾ Zha Yong-Peng¹⁾ Ni Hai-Bin^{1)2)†}

1) (*School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, China*)

2) (*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing 210044, China*)

(Received 20 July 2021; revised manuscript received 21 November 2021)

Abstract

Metal nanostructures have great potential for generating and regulating structural color. In this paper, an array structure based on silver nano asymmetric coaxial cavity is designed to study the influence of ring cavity on the generation and regulation of structural color. The ordered array of asymmetric coaxial cavity is simulated by the finite difference time domain method, and the influence of structural parameters on structural color is obtained. The results show that by adjusting the depth, opening size and thickness of coaxial cavity, the rich structural colors can be produced. The experimental results and the simulation results are basically consistent with each other. Compared with the coaxial cavity with symmetrical structure, the asymmetric metal nanostructure proposed in this work has good adjustability in color display, and has potential applications in color imaging, high-resolution imaging, anti-counterfeiting, and so on.

Keywords: isoionization element on cylindrical surface, structural color, asymmetric coaxial cavity

PACS: 41.20.-q, 61.46.-w, 42.25.Gy

DOI: 10.7498/aps.71.20211337

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61605082, 61875089), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20160969), the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, China (PAPD), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2017M611654), and the Jiangsu Provincial Postdoctoral Sustentation Fund, China (Grant No. 1701074B).

† Corresponding author. E-mail: nihaibin@nuist.edu.cn