

当 TRIZ 遇上纳米光子科学

——以超系统进化趋势为例

王勇凯, 张宛, 曹兆霞, 张中月

陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710119

摘要 发明问题与解决理论(俄文缩写 TRIZ)是苏联科学家通过对数以万计的专利分析总结而得到的一个系统的创新方法,其中向超系统进化趋势是 TRIZ 创新科学的基础,并已经成功应用于国际领先企业中;然而其在科学研究中的应用尚不多见。本文阐述了向超系统进化趋势的 4 个子趋势,及其在纳米光子科学研究中的体现,揭示了纳米结构散射吸收光谱研究的发展也符合向超系统进化趋势,并介绍了应用其子趋势设计纳米光子器件的 2 个实例:应用集成相反工程系统趋势,设计出旋转金纳米棒与金纳米缝组合的超系统,实现具有相同强度的圆二色和非对称传输;应用集成异类系统趋势,设计出金纳米棒与金膜组合的超系统,实现手性间接耦合效应。

关键词 TRIZ; 纳米光子科学; 超系统进化趋势

“TRIZ”意译为发明问题与解决理论,是苏联学者根里奇·阿奇舒勒及其同事在分析了 20 万份专利的基础上提出的。TRIZ 理论成功揭示了创造发明的内在规律和原理,即不是采取折衷或者妥协的做法,而是着力解决系统中的矛盾问题,获得最终理想解。TRIZ 理论是目前被证实的有效创新方法。TRIZ 理论的核心思想是:首先,工程系统是进化的,即无论是一个简单产品还是复杂的工程系统,都遵循客观规律而发展进化,存在客观进化规律;其次,各种技术难题、冲突和矛盾的不断解决是推动工程系统进化的动力;再次,工程系统发展的理想状态是用尽量少的资源实现尽量多的功能^[1-2]。

TRIZ 中的进化趋势是对不同领域的创新成果进行分析、总结后得出的,是具有普遍意义的经验,这些经验对各领域的创新都具有重要的指导价值。TRIZ 理论中的进化趋势能够有效地打破人的思维定势,扩展人的创新思维能力,同时又能预测新技术发展的方向,对于加速创新进程具有重要的指导价值。本文首先介绍 TRIZ 进化趋势中的向超系统进化趋势,然后介绍纳米光子科学研究中的案例符合向超系统进化趋势,最后介绍本研究组在此启发下对金属手性微纳结构的研究产生的成果。

进化趋势一直是 TRIZ 理论中最为活跃的领域。向超系统进化是 TRIZ 进化趋势中提高理想度趋势的子趋势;提高系统理想度进化趋势是 S 曲线进化趋势的子趋势(图 1)。一个

产品或物体都可以视为一个工程系统,工程系统可以简称为系统。系统是由多个子系统组成的,并通过子系统间的相互作用来实现一定的功能;子系统可以是零件或组件甚至构成元素。系统处于超系统之中,超系统是系统所在的环境,环境中其他相关系统可视为超系统构成部分。向超系统进化法则即随着工程系统进化,原系统逐渐与超系统的组件集成。向超系统进化可使系统拥有新特性和新技能。

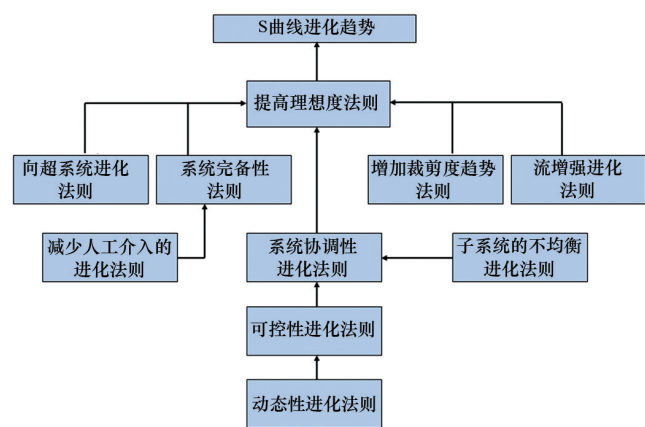


图 1 TRIZ 进化法则层次结构

Fig. 1 Hierarchy of evolutionary law in TRIZ

收稿日期:2016-12-08;修回日期:2017-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(61575117);陕西师范大学优秀博士论文项目(X2014YB08)

作者简介:王勇凯,博士研究生,研究方向为微纳米光子学,电子信箱:wang_yong_kai@126.com;张中月(通信作者),教授,研究方向为微纳米光子学和
创新方法,电子信箱:zyzhang@snnu.edu.cn

引用格式:王勇凯,张宛,曹兆霞,等. 向超系统进化在纳米光子科学中的应用[J]. 科技导报, 2017, 35(15): 45-50; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.15.006

向超系统进化趋势有以下4个子趋势。

1) 参数差异化增加的趋势。例如以早期帆船为原工程系统化,由1个帆演化为前后2个帆的超系统,进化方式是通过引入同质性系统;之后演化出横帆的超系统进化方式是通过引入多参数系统;后来帆船成为各种帆加蒸汽机组合的超系统,进化方式是通过引入竞争系统。

2) 主要功能差异化增加的趋势。例如护发产品由最初独立的洗发水和护发素,演变成洗发水和护发素一体的洗护二合一产品,这属于联合功能系统;稻田与养鱼原本具有不同的主要功能,演变为在生态养殖的稻田中养鱼,这属于异类系统的集成整合;锤子与起子具有相反的主要功能,演变为附有起子的锤子(双头),这属于整合相反的工程系统。

3) 集成深度不断增加。例如原本外科使用分立的针和线,属于非相关系统;演化为带有穿孔的手术针,属于顺序关联系统;再演化为连接有线的针头,属于部分裁剪的系统;最后演化为具有金属层的手术线,属于彻底剪裁的系统。

4) 系统集成数量增加的趋势。例如单独的电视属于单系统;演化为附有VCR功能的电视,属于双系统;再演化为附有VCR和DVD功能的电视,属于多系统。

纳米光子科学中的表面等离子激元(surface plasmon polaritons, SPPs),是存在于金属和介质界面处的电磁表面波。由于其独特的性质和可观的应用前景,近年来受到大量关注,甚至发展成为一个学科称为表面等离子激元学(Plasmonics)。表面等离子激元可以分为传播的表面等离子激元(表面等离子极化激元)和不传播的表面等离子激元(局域表面等离子激元)。由于金属纳米结构的表面等离子体光学在光催化、纳米集成光子学、光学传感、生物标记、医学成像、太阳能电池及表面增强拉曼光谱等领域有广泛的应用前景,因而受到物理学、光学、材料科学、纳米科技等研究领域的广泛关注。本文主要阐述局域表面等离子激元研究中的向超系统进化趋势。

2 向超系统进化趋势在纳米光子科学研究的应用

2.1 散射吸收光谱研究

1908年,G. Mie提出解析的Mie理论用以解释球形粒子的散射和吸收。对于小尺寸的球形金属结构,只有偶极子效应,当球形金属颗粒的尺寸增加到一定尺寸时,才表现出四偶极子效应。因为只有球形结构和无限长棒的电磁散射具有解析解,纳米结构的电磁散射特性方面的研究受到限制。近年来,随着数值技术方法(如离散偶极子近似算法、时域有限差分算法、传输矩阵算法等)和计算机的发展,拉开了纳米结构的电磁散射特性方面研究的帷幕。

当纳米结构形貌参数发生变化时,不规则形状纳米结构表现出奇异的局域表面等离子激元共振特性(图2)^[3]。图2(a)中不同入射光用不同颜色标记,其中 k 为光传播方向, E 为电场偏振方向, k 与 E 总是相互均垂。 L_E 表示金属纳米结构在电场 E 方向上的投影长度。对于椭圆形的纳米粒子来说,相比于其他入射光,沿着短轴方向入射的偏振光(黑色箭头),偏

振方向为长轴方向,其电子振荡长度最长。共振波长 $\lambda \propto L_E$,该入射光下产生的消光共振是最强的,且共振波长会明显红移。同理,在图2(b)中对于三角形的纳米粒子来说,相比于其他入射光,沿着斜边中线方向入射的偏振光(黑色箭头),偏振方向为斜边方向,电子振荡长度最长,该入射光下产生的消光共振是最强的,且共振波长会明显红移。研究结果表明,通过控制金属纳米粒子的几何形状以及线偏振光的入射方向,可以有效调节局域表面等离子激元共振特性。此外,研究者还发现金属圆柱体、三角棱柱、圆环、圆盘等均具有特异的局域表面等离子激元特性^[4-5]。

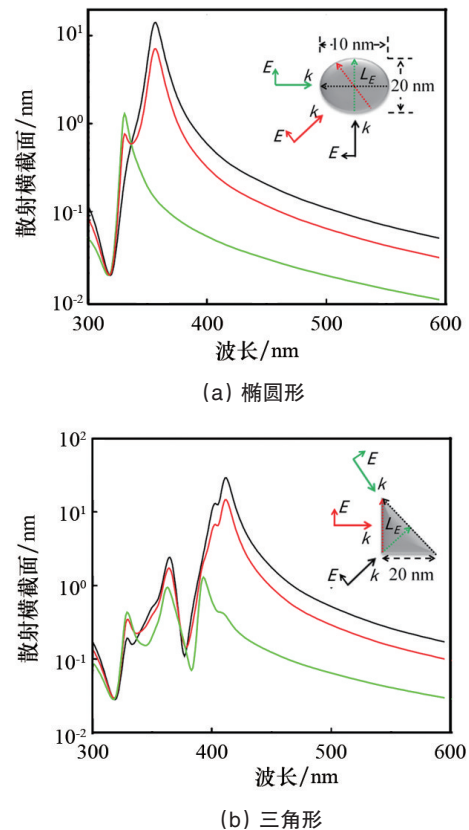


图2 在不同激发光下的金属纳米粒子消光截面
Fig. 2 Scattering cross section under different exciting lights of metallic nanoparticles with different shapes

当纳米结构的形貌发生大的差异时,纳米结构表现出更为特殊的光学特性。例如,当较短的纳米棒变为长纳米棒时,产生了多级共振特性^[6](图3)。与球形纳米粒子相比,较长的金属纳米棒其光谱不仅展示出简单的偶极共振模式,而且在短波处还会出现四偶极共振模式,如消光光谱(图3)中的模式6。这种多级共振特性可以被用来研究二次谐波增强效应。当纳米结构变为星形纳米结构,纳米结构的局域表面共振特性更为复杂,更依赖于光的入射方向和偏振方向^[7]。

以上是单个金属纳米结构的光学特性。当多个金属纳米结构进行组合时,即向超系统进化,会产生新的光学特

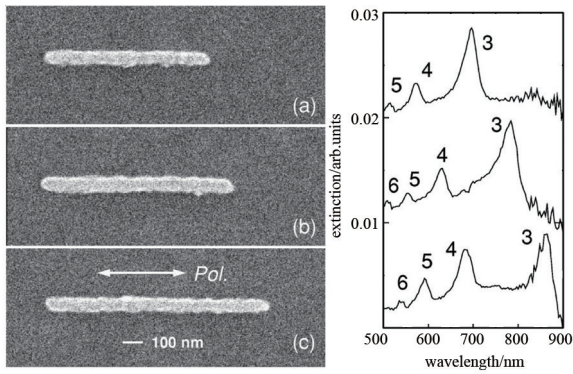


图3 不同长度的单个金属纳米棒及相应的消光光谱
Fig. 3 Metallic nanorods with different lengths and scattering spectra

性。以下通过案例分析,说明纳米光子科学研究发展也符合向超系统进化的趋势。

1) 参数差异化增加趋势中的引入同质性系统。以单个金属纳米棒为原工程系统,演化为多个相同的金属纳米棒系统,这属于第1个子趋势中的引入同质性系统。当相同的纳米棒集成在一起时,相邻的纳米棒间的耦合作用会调节纳米棒的局域表面等离子共振特性(图4)^[8]。当间距变大时,局域表面等离子共振峰蓝移;当间距变小时,共振峰红移。类似地,研究者还研究了多个其他纳米结构间的耦合作用对局域表面等离子共振的影响,如纳米球^[9]、纳米三棱柱^[10]等。研究结果表明,调控纳米结构间的距离是有效调控纳米结构光学特性的新思路和方法。

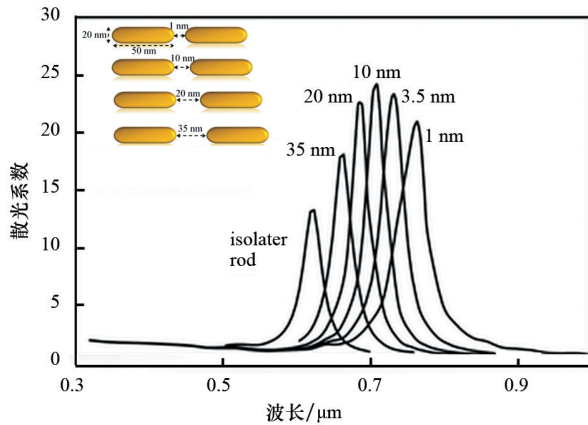


图4 由单个几何参数全同的金属纳米棒组成的金属纳米棒阵列及消光光谱
Fig. 4 Array of metallic nanorods with identical geometric parameters and scattering spectra

2) 参数差异化增加趋势中的引入多参数系统。以单个金属纳米圆盘为原工程系统,演化为多个具有不同直径的金属纳米圆盘系统,这属于第1个子趋势中的引入多参数系统。当不同纳米结构集成在一起时,纳米结构会表现出奇特的局域表面等离子共振特性。最近提出的纳米透镜(nano-

lens)技术通过级联放大(cascade enhancement)的方法,进一步提高纳米结构表面增强电场特性^[11](图5)。纳米透镜由一串自相似的金属纳米球组成,入射光所激发的大球表面的增强电场作为小球等离子共振的激发电场,此激发电场比常规入射时的激发电场强很多,故小球表面增强电场也比常规激发时强很多;小球表面的增强电场又作为更小的球等离子共振的激发电场,从而达到电场级联放大的效果。当尺寸不同的纳米结构集成在一起时,复合纳米结构更容易表现出高阶极矩效应。

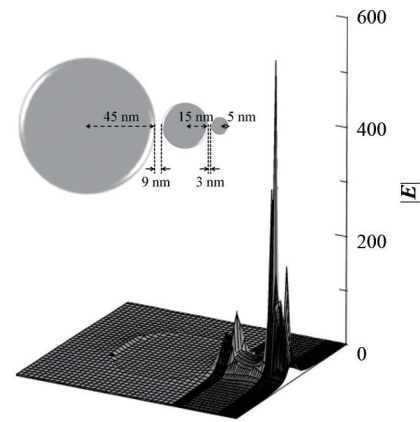
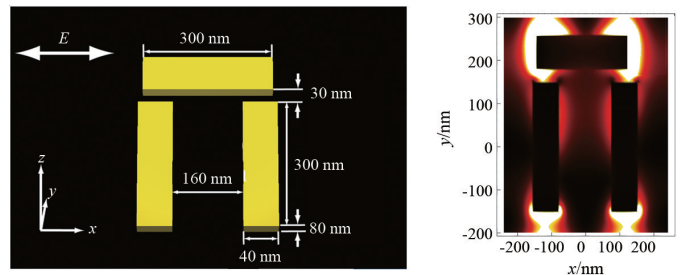


图5 由不同直径的金属纳米球组成的金属纳米球线阵列及其电场分布

Fig. 5 Linear array of metallic nanospheres with different diameters, and electric field distributions

3) 集成深度不断增加。以单个可承载横向共振的金属纳米棒(需要横向偏振激发光)和可承载纵向共振的金属纳米棒(需要纵向偏振激发光)为原工程系统,演化1个水平放置、2个竖直放置的纳米金属棒的法诺共振结构^[12](图6),其属于第3个子趋势中的顺序关联系统。如图6(a)所示,法诺共振结构只需要单个方向偏振激发光。随着集成水平深度的不断增加,带来共振方式的多样性,研究者们发现了更多特殊的光学特性。线偏振光垂直纸面入射,沿竖直方向偏振,



(a) 朵儿门结构

(b) 归一化电场强度分布

图6 法诺共振结构之一的朵儿门结构
Fig. 6 One of the Fano resonance structures: Dolmen structure

不仅可以激发出垂直方向上的共振,还可以激发出水平方向上的共振,如图6(b)。由于法诺共振对金属结构周围介质折射率非常敏感,可用于生物传感设计方面的研究。

4) 系统集成数量不断增加。以单独的金属纳米光栅和介质光栅为原工程系统,演化相互组合的金属-介质-金属光栅,属于第4个子趋势的增加系统集成数量。集成数量的不断增加使得结构组合多样化,进而功能也可实现多样化。例如,利用金属光栅结构可以产生多个共振模式^[13](图7)。双层金属-介质-金属楔形光栅的透射光谱,相比于单层金属楔形光栅的光谱在短波长处共振峰由1个变为多个。这种红外频段的超材料透射器具有实现效率高、工作频段宽的优点,在通信领域及红外探测方面具有潜在的应用价值。

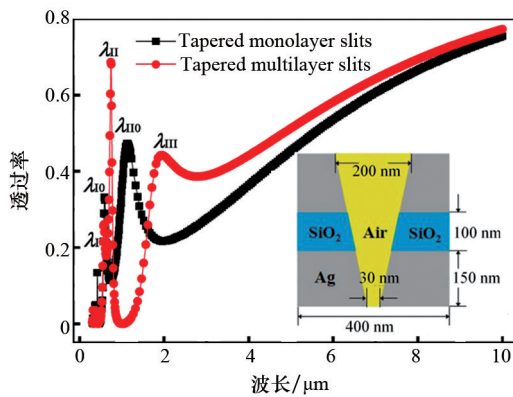


图7 双层金属-介质-金属楔形光栅结构及透射光谱
Fig. 7 Bilayer metallic-dielectric-metallic wedge-shaped grating structure

2.2 金属手性微纳结构研究

近年来,金属手性微纳结构由于其与光的强烈相互作用所展示出的新奇光学特性(例如旋光性、圆二色性、非对称传

输)而引起广泛关注^[14]。其中圆二色性($CD=T_{+-}-T_{-+}$)是指金属微纳结构具有对左右旋光吸收不同的特性;非对称传输($AT=T_{+-}-T_{-+}$)是指金属微纳结构具有对圆偏振光转化成相反偏振透射率不同的特性。此处, T_{++} 表示右旋激发右旋接收的透射率、 T_{--} 表示左旋激发左旋接收的透射率、 T_{+-} 表示右旋激发左旋接收的透射率、 T_{-+} 表示左旋激发右旋接收的透射率。 CD 已经广泛应用于光子晶体、光通信、光传感、高密度数据存储、生物大分子结构研究^[15]。

通过对向超系统进化趋势的学习和理解,本研究组将其贯彻到自己的科学研究当中,并且取得了初步成果。通过以下2个案例来说明。

1) 运用主要功能差异化增加趋势中整合相反工程系统的方法设计旋转金纳米棒与金纳米缝组合的超系统。对于传统的金属手性纳米结构都是由纳米粒子排列组合构成的,但是难以同时实现 CD 和 AT 。本研究组以单独的金属纳米棒为原工程系统,通过引入相反功能的金属纳米缝系统,构成旋转金属纳米棒与金属纳米缝组合的超系统(图8)。这属于第2个子趋势中的整合相反的工程系统。此后,通过传输矩阵分析和计算机模拟,证实可以同时实现具有相同强度的 CD 和 AT ^[16](图9)。

2) 运用主要功能差异化增加趋势中异类系统集成整合的方法设计旋转金纳米棒与金膜组合结构。传统的多层金属手性微纳结构的结构简单,且可以通过电子束曝光制得。但是随着层数的增加,透射率降低,进而导致 CD 信号降低。本研究组以传统的多层金属手性微纳结构为原工程系统,在其中加入1层连续的金属层构成新的工程系统。这属于引入异类系统的集成整合。具体设计为旋转金纳米与金膜组合结构(图9)。这个金属层将原来的系统分为2部分:输入端共振波长 $\lambda_{LC-in} = 2\pi c \sqrt{L_m C_m}$ 和输出端共振波长

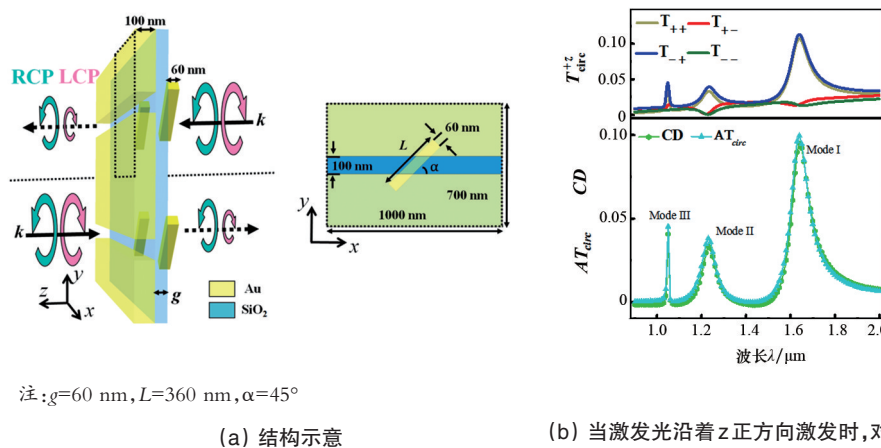


图8 旋转金纳米棒与金纳米缝组合的超系统及激发光沿着z正方向激发时的仿真 T_{circ} 矩阵、 CD 和 AT 光谱

Fig. 8 Schematic diagram of twist nanoslit-nanorod arrays and simulated T_{circ} matrix, CD spectrum, and AT spectrum of TNNAs for z-direction light excitation

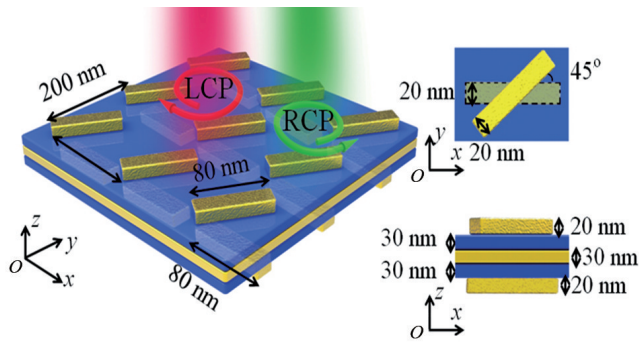


图9 旋转金纳米棒与金膜组合结构及单个周期的xOy平面视角和xOz平面视角

Fig. 9 Schematic diagram of twist nanorods separated by a metal film arrays and the parameter definitions, where the unit cell with the associated geometric features is designated in xOy plane and xOz plane

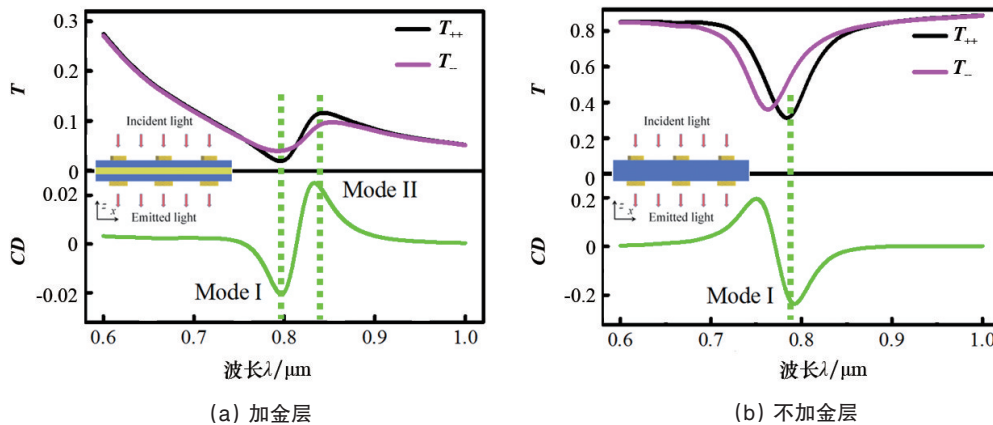


图10 仿真的 T_+ 、 T_- 、 CD 光谱
Fig. 10 Simulated T_+ , T_- , and CD spectra

3 结论

本文详细介绍了TRIZ进化趋势在纳米光子学研究发展进程中的体现,并应用TRIZ进化趋势指导研究金属手性微纳结构的圆二色性。这些结果验证了TRIZ理论在科学研究中的适应性及有效性,说明向超系统进化趋势在纳米光子科学的研究发展过程中,不仅是对已有事实的陈述,而且也可以产生具有创造性的新概念,实现光学研究的快速创新。希望更多研究者将TRIZ方法引入到其科学研究领域中,更加快速地产生产科学创新设计和方案,加快创新过程,提高自己的创新效率。

致谢 本文撰写过程中,国际TRIZ协会主席团成员孙永伟博士参与讨论,特此致谢。

参考文献(References)

[1] 赵敏, 史晓凌, 段海波. TRIZ入门及实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Zhao Min, Shi Xiaoling, Duan Haibo. TRIZ introduction and practice

$\lambda_{LC-out} = 2\pi c \sqrt{L_{out} C_{out}}$, 其中 L 和 C 表示与金属纳米棒结构参数相关的等效电感和电容。调整金属膜两端金属纳米棒的几何参数并使其阻抗匹配, 即 $\lambda_{LC-in} = \lambda_{LC-out}$ 。结果如图10所示, 加金层之后, 其 CD 光谱在波长为840 nm处产生了新的共振模式。并在分析手性产生的原因中, 首次发现电荷的间接耦合模式^[17]。

以上研究源于在TRIZ理论启发下产生的想法, 为了更好地运用向超系统的进化趋势开展科学研究, 建议以下步骤: 1) 识别当前科学研究中的组件(对应于TRIZ理论中的组件); 2) 将相同或不同的1个或多个组件集成在一起, 研究集成后系统的特性; 3) 与原特性相比, 判断集成系统的特性是否具有突出的实质性特点和显著进步(判断思路是否具有创造性); 4) 如果具有, 则该集成系统具备创造性; 5) 如果没有, 则该集成的系统不具备创造性, 再回到第2步, 采用新的集成思路。

[M]. Beijing: Science Press, 2009.
[2] 孙永伟, 谢尔盖·伊克万科. TRIZ打开创新之门的金钥匙[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Sun Yongwei, Sergei Ikoenko. TRIZ: Golden key for opening of innovative door[M]. Beijing: Science Press, 2015.
[3] Kottmann J P, Martin O J F. Spectral response of plasmon resonant nanoparticles with a non-regular shape[J]. Optics Express, 2000, 6(11): 213-219.
[4] Haynes C L, McFarland A D, Zhao L L, et al. Nanoparticle optics: The importance of radiative dipole coupling in two-dimensional nanoparticle arrays[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2003, 107(30): 7337-7342.
[5] Aizpurua J, Hanarp P, Sutherland D S, et al. Optical properties of gold nanorings[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(5): 057401.
[6] Krenn J R, Schider G, Rechberger W, et al. Design of multipolar plasmon excitations in silver nanoparticles[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(21): 3379-3381.
[7] Nehl C L, Liao H W, Hafner J H. Optical properties of star-shaped

- gold nanoparticles[J]. *Nano Letters*, 2006, 6(4): 683–688.
- [8] Cortie M B, Xu X, Ford M J. Effect of composition and packing configuration on the dichroic optical properties of coinage metal nanorods[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2006, 8(30): 3520–3527.
- [9] Ma Y W, Wu Z W, Zhang L H, et al. Theoretical study of the local surface plasmon resonance properties of silver nanosphere clusters[J]. *Plasmonics*, 2013, 8(3): 1351–1360.
- [10] Tian X, Wang Y, Cao L, et al. Transmission properties of periodically patterned triangular prisms[J]. *Photonics and Nanostructures—Fundamentals and Applications*, 2014, 12(5): 508–514.
- [11] Li K, Stockman M I, Bergman D J. Self-similar chain of metal nanospheres as an efficient nanolens[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(22): 227402.
- [12] Gallinet B, Martin O J. Influence of electromagnetic interactions on the line shape of plasmonic Fano resonances[J]. *ACS nano*, 2011, 5(11): 8999–9008.
- [13] Zhang W, Wang Y, Luo L et al. Extraordinary optical transmission of broadband through tapered multilayer slits[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(3): 547–551.
- [14] Rogacheva A V, Fedotov V A, Schwanecke A S, et al. Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 177401.
- [15] Decker M, Klein M W, Wegener M, et al. Circular dichroism of planar chiral magnetic metamaterials[J]. *Optics Express*, 2007, 32(7): 856–858.
- [16] Wang Y, Wen X, Qu Y, et al. Co-occurrence of circular dichroism and asymmetric transmission in twist nanoslit-nanorod arrays[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16425–16433.
- [17] Wang Y, Wen X, Qu Y, et al. Direct and indirect coupling mechanisms in a chiral plasmonic system[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(40): 405104.

TRIZ encounters with nanophotonics: Evolutionary trend to super system as an example

WANG Yongkai, ZHANG Wan, CAO Zhaoxia, ZHANG Zhongyue

School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract Theory of solutions of inventive problems, namely TRIZ in Russian, is an innovative method proposed by Russian scientists from innumerable patents. The evolutionary trend to a super system is the fundamental fact of the TRIZ innovating science and is successfully applied in the world leading enterprises. However, the evolutionary trend to a super system is hardly seen in the scientific research. In this paper, we introduce 4 subtrends of the evolutionary trend to a super system, which also exist in the scientific research in the cases of nanophotonics development. In addition, two examples are examined by using the 4 subtrends to design the nanophotonic devices. The one of examples is that we design the super system composed of rotary metal nanorods and metal nanoslits, by integrating inverse engineering systems, to realize the circular dichroism and the asymmetric transmission with the same strength grade. Another example is that we design the super system composed of rotary metal nanorods and metal films, by integrating heterogeneous engineering systems, to realize the indirect coupling effect in chirality.

Keywords TRIZ; nanophotonics; evolutionary trend to super system

(编辑 王志敏)