

# 向超系统进化趋势及其在表面等离子激元学研究中的应用

张中月 张宛 曹兆霞 王勇凯

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院 陕西西安 710119)

**摘要:** 进化趋势分析是 TRIZ 创新科学的基础, 通过进化趋势分析可以预测新技术发展的方向。本文介绍了向超系统进化趋势, 并综述了其在表面等离子激元学研究中的体现。本文将使读者切实感受到 TRIZ 进化趋势在科学研究中的存在, 自觉应用 TRIZ 进化趋势将有助于提高创新速度。

**关键词:** TRIZ; 向超系统进化趋势; 表面等离子激元学

## 一、引言

TRIZ 意译为发明问题解决理论, 是前苏联学者根里奇·阿奇舒勒及他的同事在分析了二十万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, 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 理论是目前被证实有效的创新方法。TRIZ 理论的核心思想首先是技术系统是进化的, 也就是说无论是一个简单产品还是复杂的技术系统都是遵循客观规律发展进化的, 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技术系统进化的动力; 再次, 技术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<sup>[1]</sup>。

TRIZ 中的进化趋势是对不同领域的已有创新成果进行分析和总结得出的, 具有普遍意义的经验, 这些经验对指导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我们的思维定势, 扩展我们的创新思维能力, 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, 然后介绍表面等离子激元学研究中的向超系统进化趋势。

## 二、向超系统进化趋势简介

进化趋势一直是 TRIZ 理论最为活跃的领域。如图 1 所示, 向超系统进化则是 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。一个产品或物体都可以看作是一个技术系统, 技术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于构成元素。系统处于超系统之中, 超系统是系统所在的环境, 环境中的其他相关的系统可以看作是超系统的构成部分。向超系统进化法则是说原系统随着技术系统进化, 它逐渐与超系统的组件集成。向超系统进化可以使系统拥有新特性和新技能。

向超系统进化趋势有四个子趋势:

(1) 超系统与原工程系统的参数差异化增加的趋势, 例如早期帆船由一个帆演化为前后两个帆, 帆船的前后帆之后演化出了横帆, 后来帆船成为各种帆加蒸汽机的组合;

(2) 超系统与原工程系统的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;

(3) 集成深度不断增加, 例如早期手表表盘和罗盘只是单纯非关联的组合在同一个表壳上, 基于美观的要求, 后期将手表的表盘外围裁剪成罗盘方向标, 彻底成为带有罗盘功能的手表;

(4) 系统集成数量增加的趋势, 例如打印机、复印机、传真和扫描仪集成为多功能复

合机。

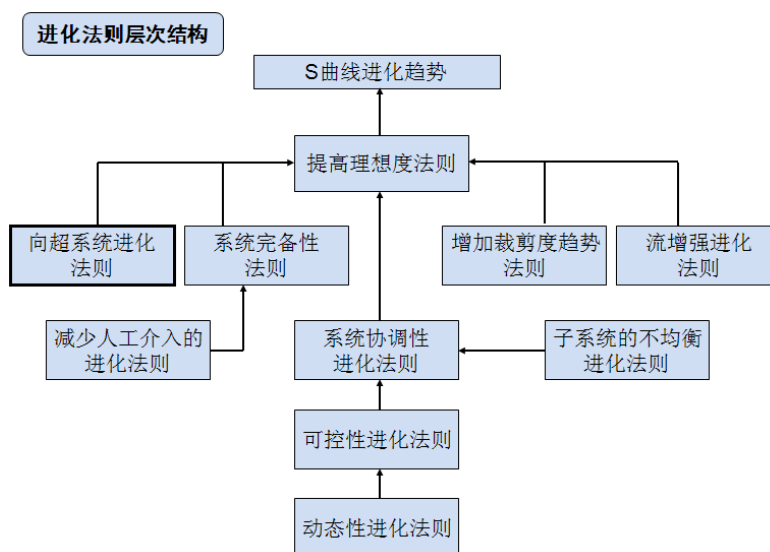


图 1 TRIZ 进化法则层次结构

### 三、表面等离子激元简介

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, 近年来受到了大量的关注, 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、太阳能电池以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。

### 四、表面等离子激元研究中的向超系统进化趋势

1905 年, 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值。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, 掀起了纳米结构的电磁散射特性方面研究的帷幕。

当纳米结构的形貌参数发生变化时, 不规则形状的纳米结构表现出奇异的局域表面等离子激元共振特性<sup>[2]</sup>。图 2 中不同颜色的箭头代表不同方向的入射光, 入射光的偏振方向均垂直于入射方向, 对于椭圆形的纳米粒子来说, 与其他方向入射的偏振光相比较, 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, 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。对于三角形的纳米粒子来说, 与其他方向入射的偏振光相比较, 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<sup>[3,4]</sup>。

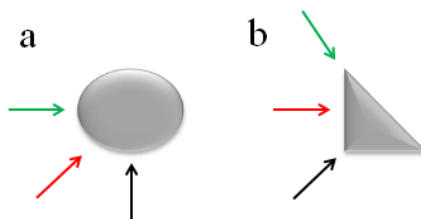


图2 (a) 椭圆形的纳米粒子; (b) 三角形的纳米粒子

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, 当纳米结构变为长纳米棒时, 产生了多级共振特性<sup>[5]</sup>。跟球形纳米粒子相比, 图3中加长纳米棒不仅可以激发出简单的偶极子共振模式, 在较短波长入射时, 还会激发出四偶极子共振模式以及更高阶的多级共振模式, 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<sup>[6]</sup>。



图3 长银纳米棒

## 1. 集成相同组件

如图4所示, 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激元共振特性<sup>[7]</sup>, 当间距变大时, 局域表面等离激元共振峰蓝移, 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(纳米球、纳米三棱柱等)间的耦合作用对局域表面等离激元共振的影响。这些研究结果都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。

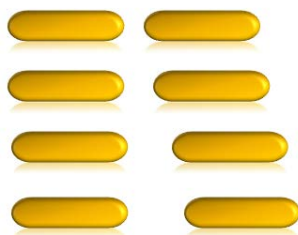


图4 长径比相同、间距不同的金纳米棒组合

## 2. 集成不同组件

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激元共振特性。最近提出的纳米透镜(nanolens)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<sup>[8]</sup>。如图5所示, 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激元共振的激发电场, 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小球等离激元共振的激发电场, 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多级距效应。



图 5 自相似纳米球阵列

### 3. 集成深度不断增加

随着集成水平深度的不断增加,金属纳米粒子的组合有了更多的方式,带来共振方式的多样性让研究者们发现了更多特殊的光学特性。一个水平放置,两个竖直放置的纳米金属棒组合可以形成法诺共振<sup>[9]</sup>,结构如下图 6 所示,线偏振光垂直纸面入射,沿竖直方向偏振,不仅可以激发出竖直方向上的共振,还可以激发出水平方向上的共振,由于法诺共振对金属结构周围介质折射率非常敏感,法诺共振结构可以用于生物传感设计方面的研究。



图 6 朵儿门结构

### 4. 集成数量不断增加

集成数量的不断增加让结构越来越复杂,实现的功能也越来越多样。例如,利用金属光栅结构可以局域能流的特点,如图 7 所示的多层金属-介质-金属楔形光栅,放在厚金属层上,减小反射和透射的能流,将所有激发能流局域在介质层内,可以实现宽频的完美吸收,在红外的某一波长范围内,吸收率达 90% 以上,这种红外频段的超材料吸收器具有实现效率高、工作频段宽的优点,在通讯领域及红外探测方面具有潜在的应用价值<sup>[10]</sup>。

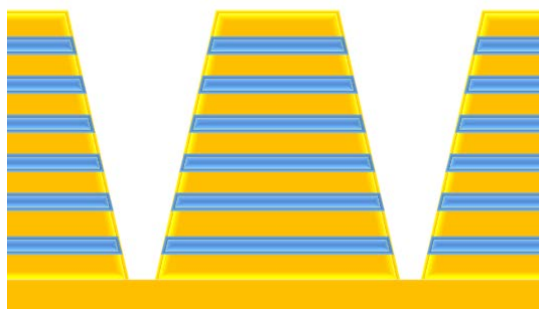


图 7 多层金属-介质-金属楔形光栅结构

## 五、结论

本文应用 TRIZ 进化趋势详细分析了微纳米光子学中表面等离激元研究中的体现。这些结果表明向超系统进化趋势在表面等离激元的研究发展过程中,不仅是对已有事实的陈述,

而且也是产生具有创造性的新概念、实现光学研究的快速创新的新工具。本文验证了 TRIZ 理论在科学研究中的适应性及有效性。将 TRIZ 方法引入到某些科学研究领域中, 能够帮助研究者更加快速的产生科学创新设计和方案, 从而加快创新过程, 提升创新效率。

## 参考文献

- [1] 赵敏, 史晓凌, 段海波. TRIZ 入门及实践. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] J. P. Kottmann and O. J. F. Martin. Spectral response of plasmon resonant nanoparticles with a non-regular shape. *Opt. Express*, 2000, 6(11): 213-219.
- [3] C. L. Haynes, A. D. McFarland, L. L. Zhao, R. P. V. Duyne, and G. C. Schatz. Nanoparticle Optics: The Importance of Radiative Dipole Coupling in Two-Dimensional Nanoparticle Arrays. *J. Phys. Chem. B*. 2003, 107(30): 7337-7342.
- [4] J. Aizpurua, P. Hanarp, D. S. Sutherland, M. Kall, G. W. Bryant, and F. J. Garciae Abajo. *Appl. Phys. Lett.* 2003, 90(5): 057401.
- [5] J. R. Krenn, G. Schider, W. Rechberger, B. Lamprecht, A. Leitner, F. R. Aussenegg, and J. C. Weeber. Design of multipolar plasmon excitations in silver nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(21):3379.
- [6] C. L. Nehl, H. W. Liao, and J. H. Hafner. Optical Properties of Star-Shaped Gold Nanoparticles. *Nano Lett.* 2006, 6(4):683-688.
- [7] M. B. Cortie, X. Xu and M. J. Ford. Effect of composition and packing configuration on the dichroic optical properties of coinage metal nanorods. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2006, 8, 3520–3527.
- [8] K. Li, M. I. Stockman, and D. J. Bergman. Self-similar chain of metal nanospheres as an efficient nanolens. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91, 227402
- [9] V. Giannini, Y. Francescato, H. Amrania, C. C. Phillips, and S. A. Maier. Fano Resonances in Nanoscale Plasmonic Systems: A Parameter-Free Modeling Approach. *Nano Lett.*, 2010, 11:2835-2840.
- [10] D. X. Ji, H. M. Song, X. Zeng, H. F. Hu, K. Liu, N. Zhang and Q. Q. Gan. Broadband absorption engineering of hyperbolic metafilm patterns. *Sci. Rep.* 2014, 4:4498.

**作者简介:** 张中月, 陕西师范大学物理学与信息技术学院教授、博导、MATRIZ三级、国际TRIZ协会内部刊物《TRIZ review》主编、《International Journal of Photoelectronics, Biomedicine, and Sustainable Energy》编辑、《中国光学》青年编委、陕西省科技厅创新工程师培训专家。