

# Research Progress of Modification the Plasmon Dephasing Time

Shuo Wang, Boyu Ji, Yang Xu, Xiaowei Song\*, Jingquan Lin

Ultrafast Optics Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin  
Email: \*songxiaowei@cust.edu.cn

Received: Dec. 17<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 1<sup>st</sup>, 2020; published: Jan. 8<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Plasmon is an electromagnetic wave pattern formed when free electrons on a metal surface interact with incident photons. The performance of a plasmon in an application is closely related to the damping of the plasmon. The dephasing time of the plasmon is an important parameter for evaluating the damping. Accurate measurement and manipulation of the dephasing time are prerequisites for the development of plasmons in future applications. This paper presents the related research on changing the conditions of nanostructured materials, structure size, incident light source, plasmon mode, and coupling effect to control the dephasing time of plasmon field in metal nanostructures. The content described in this article will help people to further understand the dynamic evolution process of plasmon, and lay the foundation for the application of plasmon in the field of the ultrafast optical switches.

## Keywords

Plasmon, Dephasing Time, Plasmon Mode, Mode Coupling

---

# 等离激元去相位时间的调控研究进展

王 硕, 季博宇, 徐 洋, 宋晓伟\*, 林景全

长春理工大学超快光学实验室, 吉林 长春  
Email: \*songxiaowei@cust.edu.cn

收稿日期: 2019年12月17日; 录用日期: 2020年1月1日; 发布日期: 2020年1月8日

---

## 摘 要

等离激元是金属表面的自由电子与入射光子相互作用时形成的一种电磁波模式, 等离激元在应用中的性能\*通讯作者。

文章引用: 王硕, 季博宇, 徐洋, 宋晓伟, 林景全. 等离激元去相位时间的调控研究进展[J]. 应用物理, 2020, 10(1): 15-23. DOI: 10.12677/app.2020.101003

能与等离子激元的阻尼密切相关。等离子激元的去相位时间是评价阻尼的重要参数,精确的测量及操纵去相位时间是等离子激元在未来应用发展的先决条件。本文给出了改变纳米结构材料、结构尺寸、入射光源、等离子激元模式及耦合作用等条件实现对金属纳米结构中等离子激元场去相位时间调控的相关研究。本文所述内容有助于人们对等离子激元动力学演化过程作进一步理解,为等离子激元在超快光开关等领域的应用奠定基础。

## 关键词

等离子激元, 去相位时间, 等离子激元模式, 模式耦合

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当外界光照射到金属纳米结构上时,金属中的自由电子会与光子相互作用形成等离子激元。等离子激元分为传导型和局域型两种,传导表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)沿金属与介质之间的界面传播,其传播距离取决于材料本身及因其共振而产生的欧姆损耗[1]。在制备新型亚波长波导、新型能源及光存储等领域有很重要的应用,但因为色散关系表面等离子激元无法被入射到金属表面的光直接激发。局域表面等离子激元(Localized Surface Plasmon, LSP)是能量高度局域化的结果,相较于 SPP 来说 LSP 更易被光激发。因共振频率受多种因素的影响,可调范围广,其可以突破光的衍射极限,在增强拉曼光谱及生物检测等领域有广泛的应用,吸引了很多学者的关注。

等离子激元最重要的性质是其振荡衰减过程,即去相位过程,衰减可分为向外衰变成光子的辐射衰减过程及因吸收入射光而引起的非辐射衰减过程(带间跃迁和带内跃迁)。去相位时间是描述等离子激元衰减的重要参数,等离子激元的许多应用与去相位时间有着重要的依赖关系,例如表面增强拉曼散射(Surface Enhanced Raman Scattering, SERS) [2] [3]、荧光增强[4] [5] [6]及太阳能电池应用的光捕获[7] [8]等。且去相位时间可以表征等离子激元的寿命,是评价辐射与非辐射阻尼的重要参数,也是等离子激元动力学演化中最重要的部分,所以对去相位时间的研究有助于人们进一步理解等离子激元的物理机制及其时空演化过程。通常可以通过两种方法得到等离子激元的去相位时间,分别是线宽计算法和阻尼谐振子模型拟合法。利用线宽及模型拟合来获取去相位时间的方法已有学者对其进行了充分的研究[9] [10] [11] [12],此处不再进行详细说明。对等离子激元去相位时间调控的研究为人们极小纳米尺度上操纵等离子激元奠定坚实基础,使等离子激元在传感及超快电子源等领域有更广泛的应用前景,因此目前对等离子激元去相位时间调控的研究已经吸引了大量研究者的关注。

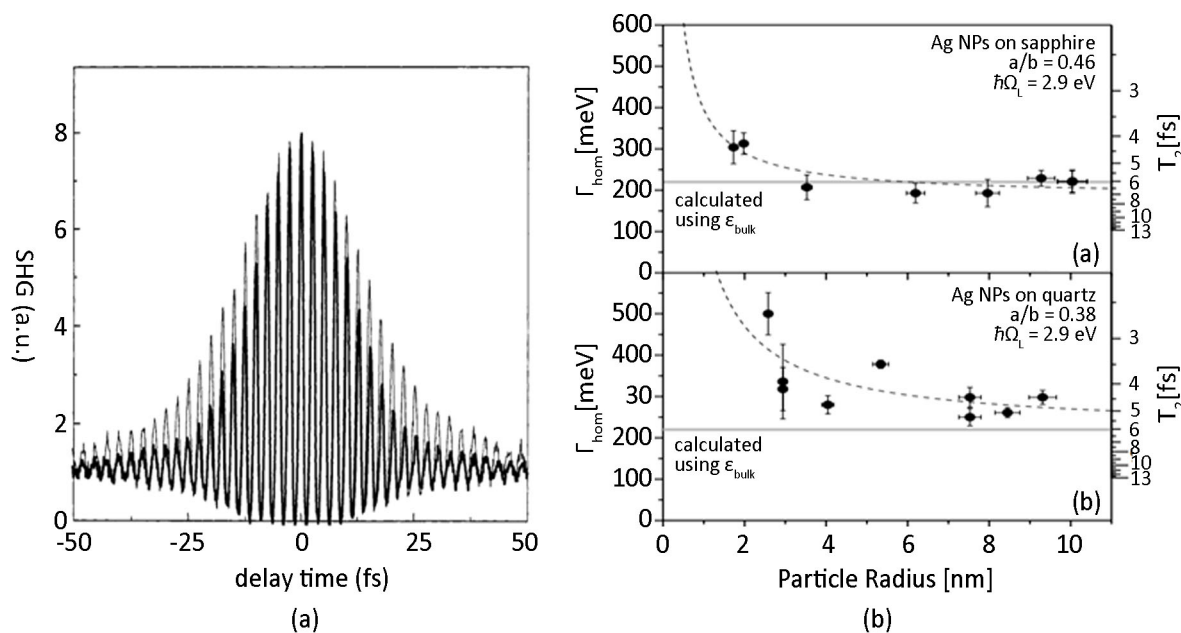
## 2. 等离子激元去相位的调控研究

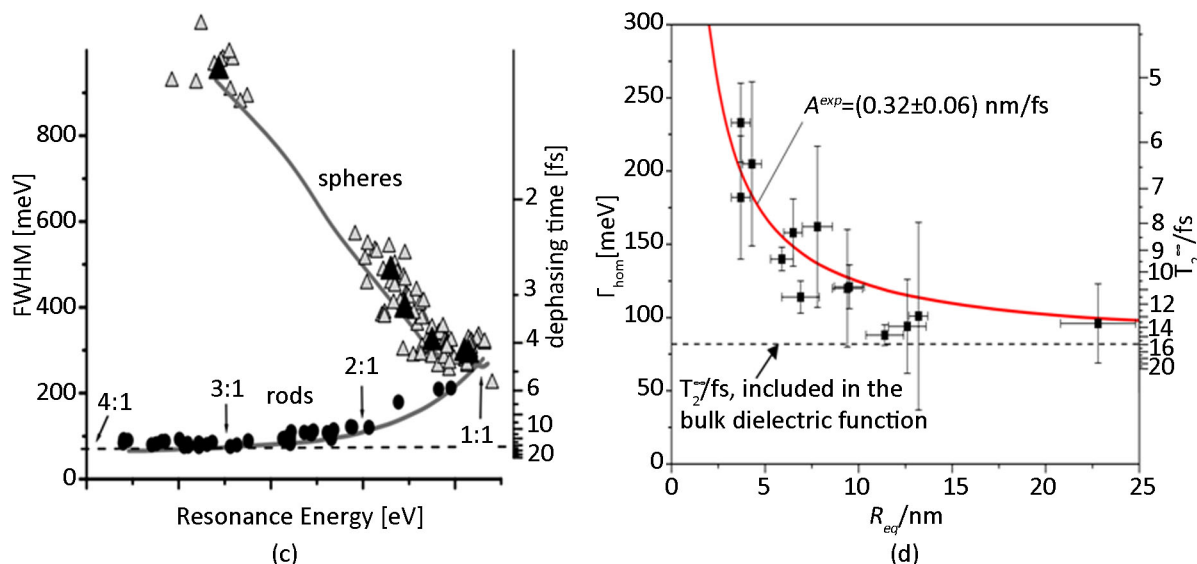
金属纳米结构之所以能有广泛的应用是因为它们能够与入射光相互作用等离子激元,而等离子激元的广泛应用是得益于弱的等离子激元阻尼。金属纳米结构的形状、尺寸、材料及介电环境等因素都会影响等离子激元的性质,引起辐射或非辐射阻尼的变化,进而影响等离子激元场的去相位过程。本文我们将会从纳米结构材料、尺寸、光源条件及等离子激元模式等几方面来讨论等离子激元去相位时间的调控,分析其影响因素和调控机理。为人们进一步理解等离子激元动力学演化过程及其在超快纳米等离子激元芯片等领域的应用奠定基础。

## 2.1. 纳米结构材料及尺寸对等离激元去相位的调控

纳米结构的材料会影响等离激元共振频率，而共振频率是影响等离激元去相位过程的一个重要因素。已有研究表明可以通过改变纳米材料使等离激元线宽发生变化来调控去相位时间。1999年 B. Lamprecht 等人[13]利用二阶非线性光学自相关方法研究了电子束光刻技术[14][15]制造的非中心对称的金属纳米颗粒阵列中等离激元的去相位，材料是金和银两种，获得的函数二次谐波产生强度和延迟时间是脉冲的二阶自相关函数(ACF)，其包含有关脉冲长度的信息。对于金颗粒阵列，颗粒的 ACF 比激发激光脉冲的 ACF 宽，如图 1(a)所示，并用单粒子光谱法给出了金颗粒去相位时间的值为 8 fs。与金颗粒相比银的表面化学阻尼机制比较活跃，获得的银的去相位时间在 7 和 10 fs 之间变化[13]。可以看到不同材料的去相位时间是不同的，所以可以通过设置不同的材料来实现对等离激元去相位过程的调控。

等离激元共振频率是影响等离激元去相位过程的一个因素，纳米结构的形状和尺寸都会影响共振频率，进而影响去相位过程。2002年 J. Bosbach 等人通过持续光谱烧孔和激光辅助纳米颗粒制备这两种特殊方法的组合，系统地研究了银纳米颗粒中表面等离激元的去相位时间[16]。他们发现去相位时间对频率有强烈依赖性，这反映了带间阻尼的相关性，并且在测量去相位时需要精确控制颗粒形状。同时观察到去相位时间随着粒径的减小而减小，如图 1(b)所示。同年，T. Franzl 等人使用光-散射光谱法研究了金纳米棒和球粒子中等离激元的去相位过程[17]，他们从不同直径的金纳米球和各种长宽比的金纳米棒的光谱中提取等离激元的线宽，如图 1(c)所示，并利用公式(1)计算出两种结构的去相位时间值。他们认为体积较小的纳米棒中辐射阻尼可忽略不计，非辐射阻尼起主要作用。随着纳米棒体积的继续增大，辐射阻尼起主要作用。即在辐射阻尼可忽略不计的纳米棒中等离激元的去相位时间随着纳米棒体积的增大而增大，在辐射阻尼起主导作用的纳米棒中等离激元的去相位时间随着纳米棒体积的增大而减小。2010年 F. Hubenthal 等人研究了金纳米颗粒的 LSP 极化共振的强阻尼[18]。他们在  $h\nu = 1.85$  eV 的固定光子能量下，系统地研究了金纳米颗粒中 LSP 极化共振的超快速去相位时间与粒径的关系，并提取了从  $T_2 = 5.5$  fs 到 15.0 fs 的去相位时间，如图 1(d)所示。因此，通过设置不同的结构尺寸可实现对等离激元去相位过程的调控。





**Figure 1.** (a) Autocorrelation function of laser pulses and plasmons of gold nanoparticles [13]; (b) Uniform line width and dephasing time of SP in silver nanoparticles are functions of nanoparticle size [16]; (c) The relationship between line width and dephasing time and resonance energy for different structures at different sizes [17]; (d) Dephasing time (right axis) and uniform line width (left axis) as a function of the equivalent radius of gold nanoparticles [18]

**图 1.** (a) 激光脉冲及金纳米粒子等离激元的自相关函数[13]; (b) 银纳米粒子中 SP 的均匀线宽和去相位时间是纳米粒子大小的函数[16]; (c) 不同结构在不同尺寸下线宽和去相位时间与共振能量的关系[17]; (d) 去相位时间(右轴)和均匀线宽(左轴)作为金纳米粒子等效半径的函数[18]

## 2.2. 光源条件对等离激元去相位的调控

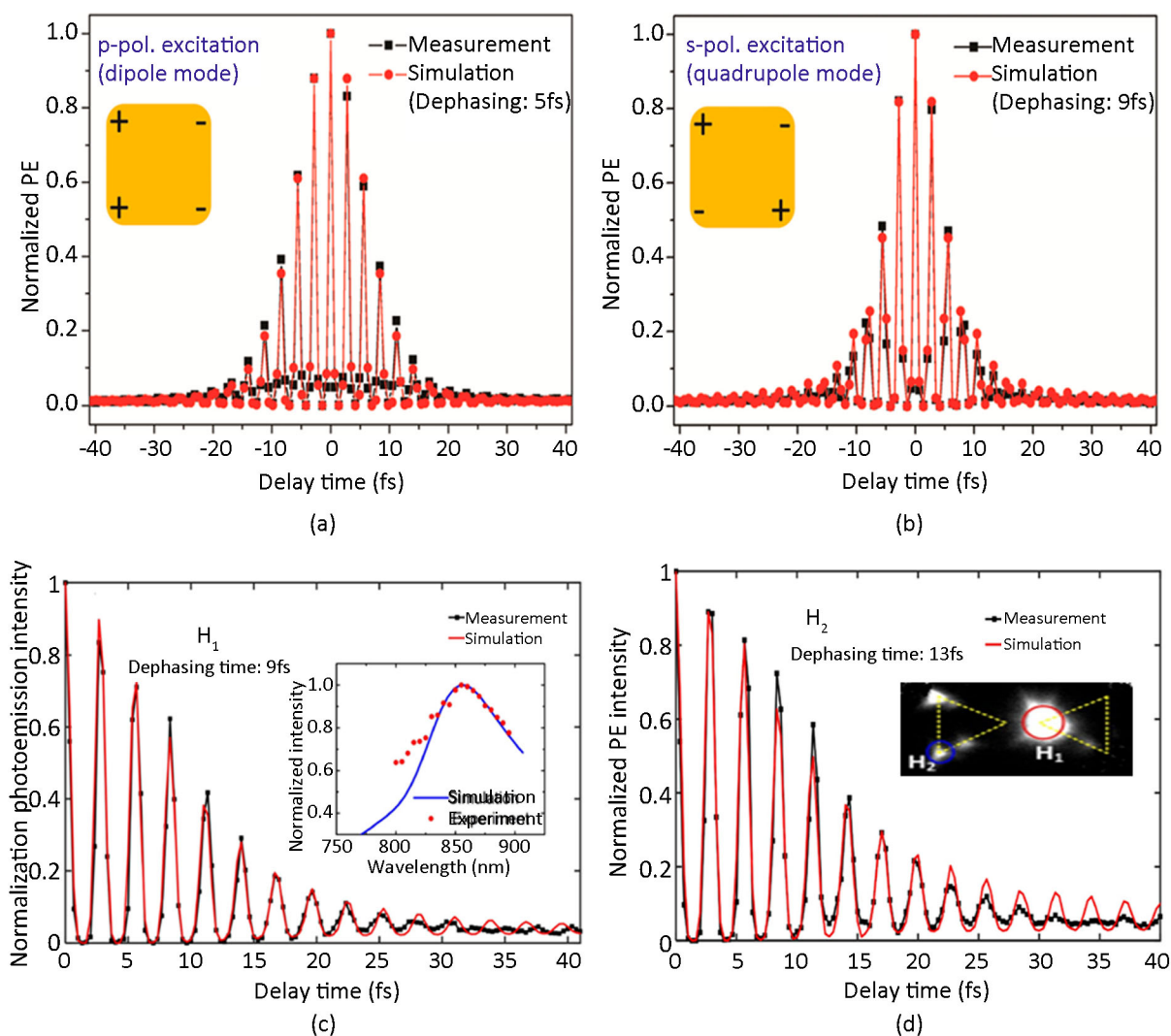
通过改变激发光的条件, 如光源偏振方向或入射角度等可以获得不同的等离激元模式。不同等离激元模式具有不同的阻尼, 如偶极模式相比于四极模式有更大的辐射阻尼, 这会导致等离激元去相位时间的不同。已有研究表明可以通过改变光源条件使等离激元模式发生变化来调控去相位时间。因此模式的改变同样会影响等离激元去相位过程。2016年 Sun quan 研究组利用 PEEM [19] [20] [21] 研究发现在斜入射下对称金纳米块中的偶极模式和四极模式可以被选择性激发, 即 P 偏振时只有偶极模式被激发, S 偏振时四极模式占主导地位, 并且场增强大于偶极模式的场增强。他们利用时间分辨 PEEM 测量及阻尼谐振子模型拟合得到偶极模式和四极模式的去相位时间分别为 5 fs 和 9 fs [10], 如图 2(a)~(b)所示。

光源入射角度的改变会使纳米结构与激发光的相对位置不同, 会产生延迟效应, 导致等离激元去相位过程不同。2018年 Lin 研究组结合干涉时间分辨 PEEM 与阻尼谐振子模型, 研究了单个金 bowtie 纳米结构在斜入射下等离激元场的超快动力学[22]。他们实验性地获得了 bowtie 纳米结构的不同尖端处等离激元的去相位时间, 同时, 他们证明了实验上获得的时间分辨光发射信号可用于直接比较不同热点的共振频率和去相位时间。在斜入射时同一结构中不同热点的模式不同, 去相位过程不同, 这是因为光斜入射时存在延迟效应及两个三角与光的相对位置不同, 导致去相位时间不同, 如图 2(c)~(d)所示。这些研究表明可以通过操纵光源来选择性的激发等离激元模式, 从而达到调控等离激元去相位的目的。

## 2.3. 结构耦合对等离激元去相位的调控

当金属纳米结构中存在相互影响的多个等离激元场时, 主要有两种情况, 一种是多个等离激元场重叠, 即没有发生模式的改变, 振荡呈简单的指数衰减, 无拍频现象。另一种是模式发生改变, 等离激元振荡不再呈简单的指数衰减, 出现拍频现象。当存在多个等离激元场时我们认为纳米结构中有耦合作用存在, 耦合等离激元场具有极高的场增强和局域特性, 且物理现象相比于非耦合场来说更加丰富。对去





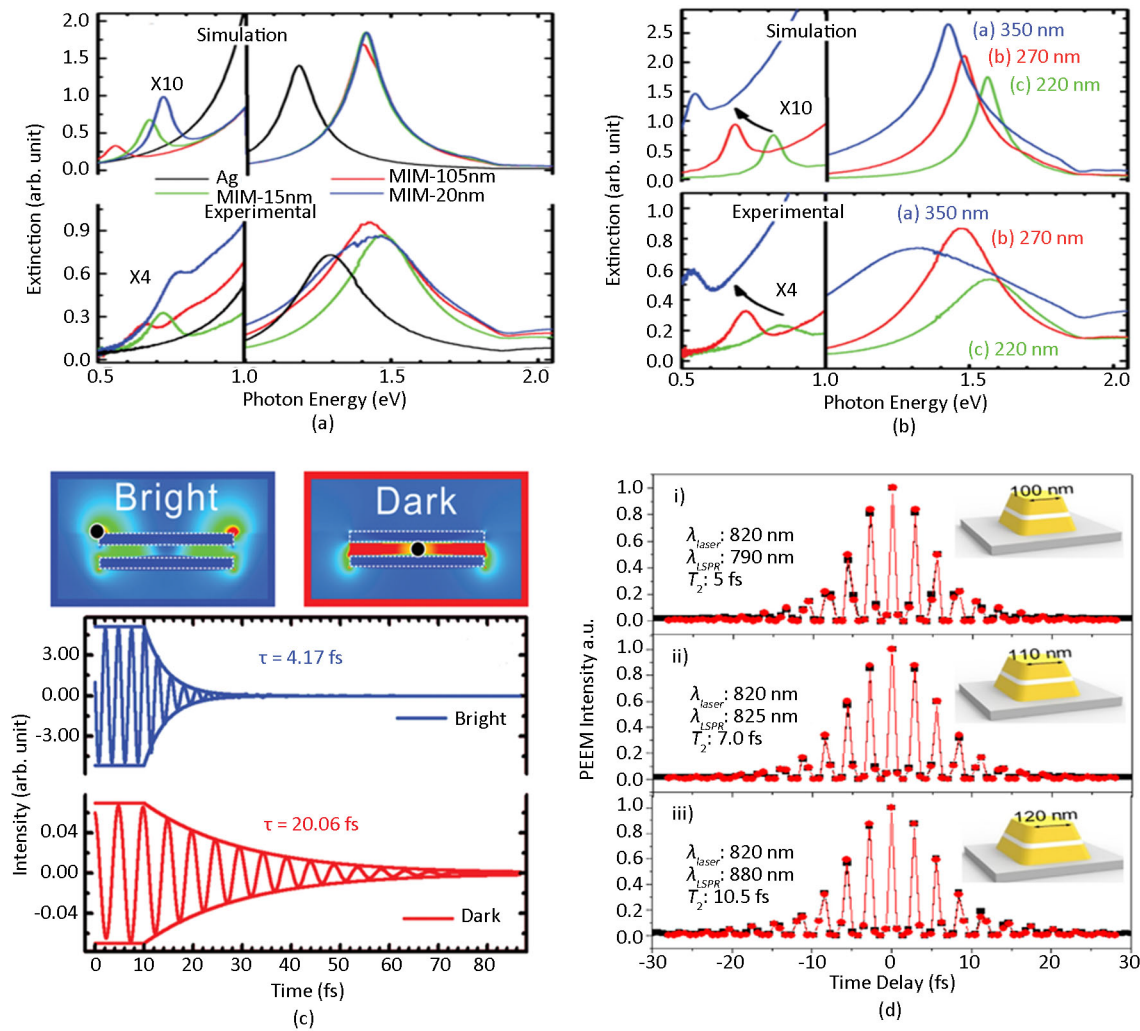
**Figure 2.** (a) Fitting result of dipole mode dephasing time in gold nanoblock,  $T_2 = 5$  fs [10]; (b) Fitting result of quadrupole mode dephasing time in gold nanoblock,  $T_2 = 9$  fs [10]; (c) Fitting result of phase removal time at hot spot H1 in bowtie nanostructures,  $T_2 = 9$  fs [22]; (d) Fitting result of phase removal time at hot spot H2 in bowtie nanostructures,  $T_2 = 13$  fs [22]

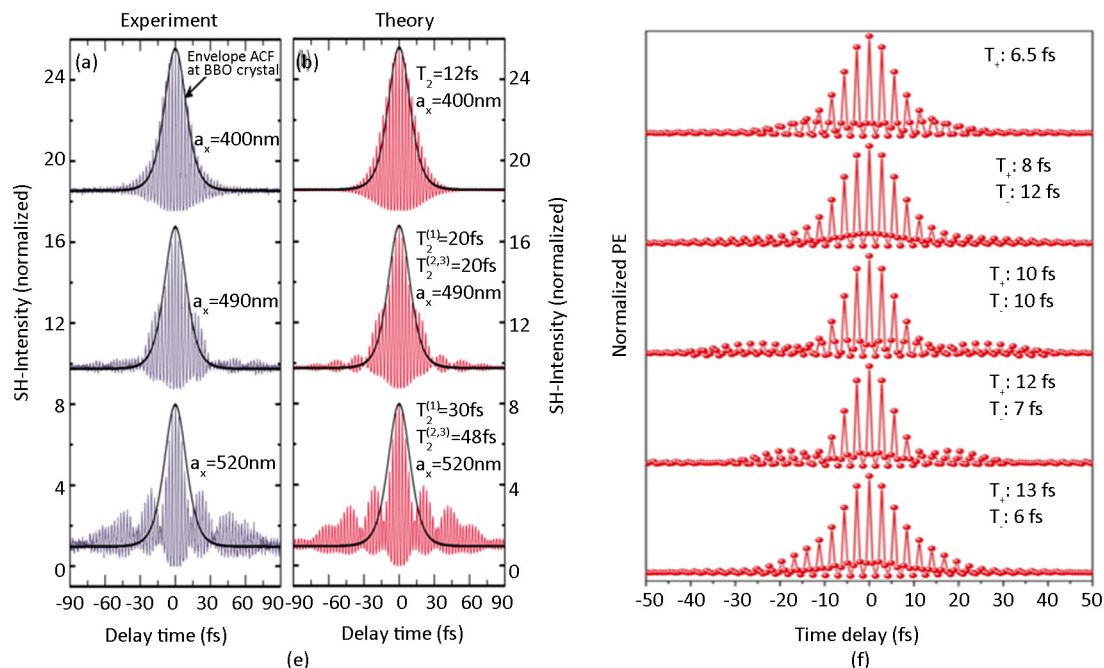
**图 2.** (a) 金纳米块中偶极模式去相位时间的拟合结果,  $T_2 = 5$  fs [10]; (b) 金纳米块中四极模式去相位时间的拟合结果,  $T_2 = 9$  fs [10]; (c) bowtie 纳米结构中热点 H1 处去相位时间的拟合结果,  $T_2 = 9$  fs [22]; (d) bowtie 纳米结构中热点 H2 处去相位时间的拟合结果,  $T_2 = 13$  fs [22]

相位时间进行调控的最终目的是延长或缩短等离子激元的去相位时间, 研究发现延长去相位时间的一种方法是激发由于辐射损失减少而引起的暗(亚)辐射模式[23] [24], 或者多种等离子激元模式之间的强耦合也可以实现对等离子激元去相位时间的调控[8] [25]-[29]。Yun-Chorng Chang 等人研究了由纳米球透镜光刻(nanospherical lens lithography, NLL)技术制备的金属-绝缘体-金属(metal-insulator-metal, MIM)纳米盘阵列中吸收主导的键合暗等离子激元模式[23]。他们根据 MIM 纳米盘阵列的吸收光谱揭示了等离子激元杂化理论预测的反键合和键合模式, 发现键合模式显示出反相电荷分布并且对应于暗等离子激元模式。根据消光光谱发现, 可以通过改变绝缘体厚度和纳米盘的直径可实现等离子激元模式的调谐, 如图 3(a)-(b)所示。他们对两种模式的近场时间演变进行了模拟, 发现明等离子激元模式会很快衰减, 衰减时间常数估计为 4.17 fs, 对于暗等离子激元模式, 衰减时间比较缓慢, 衰减时间估计为 20 fs, 如图 3(c)所示, 可以看到暗等离子激元模式的衰减时间是明等离子激元模式的 5 倍。2019 年 Sun quan 研究组设计了堆叠纳米间隙金结构, 通过激

发结构中的暗等离子激元模式来实现对等离子激元去相位时间的调控，并实现了极强的近场增强[30]，这里的暗等离子激元模式是由上下两块 Au 纳米结构间的近场耦合激发的。他们给出了不同上部金块尺寸的光辐射强度曲线，发现随着上部金块尺寸的增大，去相位时间变长，如图 3(d)所示。他们还发现与单独金纳米块的等离子激元模式相比，暗等离子激元模式的激发使结构中等离子激元的去相位时间延长了 3 倍，这为等离子激元的结构设计提供了指导。这些研究证实了暗等离子激元模式会有更长的寿命，可以通过激发等离子激元的暗模式来实现对等离子激元去相位过程的调控。

T. Zentgraf 等人利用飞秒时间分辨二阶干涉自相关技术研究了二维金属光子晶体中由于波导模式和局域等离子激元模式之间的强耦合而出现的新的准粒子波导 - 等离子激元(waveguide-plasmon polariton, WPP) 的超快去相位时间[9]。他们通过调节光子晶体的周期来调节电子和光子共振之间的耦合强度，进而调控金属光子晶体中相干激发的去相位时间，如图 3(e)所示。因为耦合导致 WPP 状态密度的改变影响了辐射弛豫率，进而达到调控等离子激元去相位的目的。Yang Jinghuan 等人使用光辐射电子显微镜研究了多层纳米结构的频域和时域的近场特性。他们通过调节多层纳米结构的局域表面等离子激元共振和表面等离子激元 Bloch 波之间的强耦合来实现对等离子激元去相位时间的调控[12]。通过调节阵列的周期实现 LSPR 和 SPP-Bloch 波之间耦合强度的变化，从而改变 LSPR 和 SPP-Bloch 波的去相位时间，如图 3(f)所示。此项研究进一步说明了耦合作用的存在对等离子激元去相位调控的重要性。





**Figure 3.** (a) Simulated and experimental extinction spectra of different insulator thicknesses [23]; (b) Simulated and experimental extinction spectra of different nanodisk diameters [23]; (c) decay time curves in two modes of light and dark [23] (d) Fitting results of light radiation intensity curves of stacked gap structures of different sizes [30]; (e) Experimental and theoretical second-order interference autocorrelation functions of arrays at different periods and dephasing time of each polarization branch [9]; (f) Time-resolved PE signal with best fitting dephasing time calculated under different periods with fixed size [12]

**图 3.** (a) 不同绝缘体厚度的模拟和实验的消光光谱[23]; (b) 不同纳米盘直径的模拟和实验的消光光谱[23]; (c) 明暗两种模式下的衰减时间曲线[23]; (d) 不同尺寸的堆叠间隙结构的光辐射强度曲线的拟合结果[30]; (e) 实验和理论上不同周期下阵列的二阶干涉自相关函数及各极化分支的去相位时间[9]; (f) 尺寸固定的不同周期下计算的具有最佳拟合去相位时间的时间分辨 PE 信号[12]

综上所述可以看出, 改变纳米结构的材料、尺寸、等离子元模式、入射光条件及耦合作用等因素均会影响等离子元的去相位过程。可以看到人们对复杂等离子元模式及耦合作用下等离子元场衰减过程的研究表现出极大的兴趣。通过对结构进行不断的设计及优化, 可以控制等离子元场的衰减过程, 实现对等离子元去相位时间的操纵。为新一代光电子器件的研发奠定坚实的理论基础。

### 3. 结束语

本文介绍了对等离子元去相位时间调控的相关研究, 调控等离子元去相位时间的本质是对等离子元衰减过程的调控。根据相关研究发现纳米结构的材料、形状、尺寸、明暗模式、激发条件及耦合作用的存在等因素都会影响等离子元的衰减过程, 进而影响其去相位时间的数值。可以看到目前对于存在复杂等离子元模式的去相位过程的理解不够深刻, 且多模式等离子元去相位时间的具体数值不易得到。对等离子元去相位时间调控的研究有助于人们进一步理解等离子元动力学演化过程, 特别是对复杂等离子元场去相位过程的研究, 为等离子元在超快光开关及超快电子源等领域的应用奠定基础。

### 基金项目

长春理工大学校青年基金项目(XQNJJ-2018-02)支持。

### 参考文献

- [1] 邵磊, 等. 局域表面等离子元[J]. 物理, 2014, 43(5): 290-298.

- [2] Wokaun, A., Gordon, J.P., *et al.* (1982) Radiation Damping in Surface-Enhanced Raman Scattering. *Physical Review Letters*, **48**, 1574. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.48.1574>
- [3] Kneip, K., *et al.* (1997) Single Molecule Detection Using Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS). *Physical Review Letters*, **78**, 1667-1670. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.1667>
- [4] Akselrod, G.M., *et al.* (2014) Probing the Mechanisms of Large Purcell Enhancement in Plasmonic Nanoantennas. *Nature Photonics*, **8**, 835-840. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.228>
- [5] Kinkhabwala, A., *et al.* (2009) Large Single-Molecule Fluorescence Enhancements Produced by a Bowtie Nanoantenna. *Nature Photonics*, **3**, 654-657. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.187>
- [6] Russell, K.J., Liu, T.L., Cui, S.Y. and Hu, E.L. (2012) Large Spontaneous Emission Enhancement in Plasmonic Nanocavities. *Nature Photonics*, **6**, 459-462. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.112>
- [7] Tian, Y. and Tsuma, T. (2005) Mechanisms and Applications of Plasmon-Induced Charge Separation at TiO<sub>2</sub> Films Loaded with Gold Nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, **127**, 7632-7637. <https://doi.org/10.1021/ja042192u>
- [8] Zeng, P., *et al.* (2016) Photoinduced Electron Transfer in the Strong Coupling Regime: Waveguide-Plasmon Polaritons. *Nano Letters*, **16**, 2651-2656. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00310>
- [9] Zentgraf, T., Christ, A., Kuhl, J. and Giessen, H. (2004) Tailoring the Ultrafast Dephasing of Quasiparticles in Metallic Photonic Crystals. *Physical Review Letters*, **93**, Article ID: 243901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.243901>
- [10] Sun, Q., Yu, H., *et al.* (2016) Dissecting the Few-Femtosecond Dephasing Time of Dipole and Quadrupole Modes in Gold Nanoparticles Using Polarized Photoemission Electron Microscopy. *ACS Nano*, **10**, 3835-3842. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b00715>
- [11] Aeschlimann, M., Brixner, T., *et al.* (2016) Determination of Local Optical Response Functions of Nanostructures with Increasing Complexity by Using Single and Coupled Lorentzian Oscillator Models. *Applied Physics B*, **122**, Article No. 199. <https://doi.org/10.1007/s00340-016-6471-3>
- [12] Yang, J.H., Sun, Q., *et al.* (2018) Manipulation of the Dephasing Time by Strong Coupling between Localized and Propagating Surface Plasmon Modes. *Nature Communications*, **9**, Article No. 4858. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07356-x>
- [13] Lamprecht, B., Leitner, A. and Aussenegg, F.R. (1999) SHG Studies of Plasmon Dephasing in Nanoparticles. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, **68**, 419-423. <https://doi.org/10.1007/s003400050643>
- [14] Gotschy, W., Vonmetz, K., *et al.* (1996) Optical Dichroism of Lithographically Designed Silver Nanoparticle Films. *Optics Letters*, **21**, 1099-1101. <https://doi.org/10.1364/OL.21.001099>
- [15] Gotschy, W., Vonmetz, K., *et al.* (1996) Thin Films by Regular Patterns of Metal Nanoparticles: Tailoring the Optical Properties by Nanodesign. *Applied Physics B*, **63**, 381-384. <https://doi.org/10.1007/BF01828742>
- [16] Bosbach, J., Hendrich, C., *et al.* (2002) Ultrafast Dephasing of Surface Plasmon Excitation in Silver Nanoparticles: Influence of Particle Size, Shape, and Chemical Surrounding. *Physical Review Letters*, **89**, Article ID: 257404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.257404>
- [17] Franzl, T., Wilk, T., *et al.* (2002) Drastic Reduction of Plasmon Damping in Gold Nanorods. *Physical Review Letters*, **88**, Article ID: 077402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.077402>
- [18] Hubenthal, F., Hendrich, C., *et al.* (2010) Damping of the Localized Surface Plasmon Polariton Resonance of Gold Nanoparticles. *Applied Physics B*, **100**, 225-230. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4064-0>
- [19] Imura, K., Nagahara, T. and Okamoto, H. (2005) Near-Field Optical Imaging of Plasmon Modes in Gold Nanorods. *The Journal of Chemical Physics*, **122**, Article ID: 154701. <https://doi.org/10.1063/1.1873692>
- [20] Ndiaye, C., Zerrad, M., Lereu, A.L., *et al.* (2013) Giant Optical Field Enhancement in Multi-Dielectric Stacks by Photon Scanning Tunneling Microscopy. *Applied Physics Letters*, **103**, Article ID: 131102. <https://doi.org/10.1063/1.4822093>
- [21] Qin, J., Lang, P., Ji, B.Y., *et al.* (2016) Imaging Ultrafast Plasmon Dynamics within a Complex Dolmen Nanostructure Using Photoemission Electron Microscopy. *Chinese Physics Letters*, **33**, Article ID: 116801. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/33/11/116801>
- [22] Qin, Y.L., Ji, B.Y., *et al.* (2019) Characterization of Ultrafast Plasmon Dynamics in Individual Gold Bowtie by Time-Resolved Photoemission Electron Microscopy. *Applied Physics B*, **125**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1007/s00340-018-7112-9>
- [23] Chang, Y.C., Wang, S.M., *et al.* (2012) Observation of Absorption-Dominated Bonding Dark Plasmon Mode from Metal-Insulator-Metal Nanodisk Arrays Fabricated by Nanospherical-Lens Lithography. *ACS Nano*, **6**, 3390-3396. <https://doi.org/10.1021/nn300420x>
- [24] Liu, M.Z., Lee, T.W., *et al.* (2009) Excitation of Dark Plasmons in Metal Nanoparticles by a Localized Emitter. *Physi-*



- 
- cal Review Letters*, **102**, Article ID: 107401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.107401>
- [25] Shelton, D.J., *et al.* (2011) Strong Coupling between Nanoscale Metamaterials and Phonons. *Nano Letters*, **11**, 2104-2108. <https://doi.org/10.1021/nl200689z>
- [26] Vakevainen, A.I., *et al.* (2014) Plasmonic Surface Lattice Resonances at the Strong Coupling Regime. *Nano Letters*, **14**, 1721-1727. <https://doi.org/10.1021/nl4035219>
- [27] Salomon, A., Gordon, R.J., Prior, Y., Seideman, T. and Sukharev, M. (2012) Strong Coupling between Molecular Excited States and Surface Plasmon Modes of a Slit Array in a Thin Metal Film. *Physical Review Letters*, **109**, Article ID: 073002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.073002>
- [28] Christ, A., Tikhodeev, S.G., Gippius, N.A., Kuhl, J. and Giessen, H. (2003) Waveguide Plasmon Polaritons: Strong Coupling of Photonic and Electronic Resonances in a Metallic Photonic Crystal Slab. *Physical Review Letters*, **91**, Article ID: 183901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.183901>
- [29] Vasa, P., *et al.* (2013) Real-Time Observation of Ultrafast Rabi Oscillations between Excitons and Plasmons in Metal Nanostructures with J-Aggregates. *Nature Photonics*, **7**, 128-132. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.340>
- [30] Ueno, K., *et al.* (2019) Control of Plasmon Dephasing Time Using Stacked Nanogap Gold Structures for Strong Near-Field Enhancement. *Applied Materials Today*, **14**, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.12.004>