

SPPs 激射中 Airy 表面等离子体的特性分析

朱 君^{1,2}, 李志全²

(1. 广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 为了研究表面等离子体(SPPs)传播产生的 Airy 等离子体的特性,分析和仿真了 Airy 等离子体的独特性质。利用 SPPs 的激射原理,对 Airy 等离子体的本征态进行了理论分析,研究了光栅耦合 SPPs 的激射结构中 Airy 等离子体的性质。结果表明:无衍射的 Airy 表面等离子体不仅具有在近场能量放大和快速传播的特性,而且还能利用其特性控制光束的传播;Airy 表面等离子体只有在一定宽度下与光激发的相互作用才能抑制能量损耗,在基质宽度小于 600 nm 左右时无法出现显著的 Airy 表面等离子体;不同宽度的基质条件下激射能量与产生 Airy 离子的趋势一致;Airy 表面等离子体在激发能量较小时就能实现快速传播,在 2.3 eV 作用时能量的增加对 Airy 的等离子体的作用不再明显。这一研究对于 SPPs 的强局域化应用实现、表面光学处理和线性控制无衍射 SP 光学产生了积极的作用。

关键词: 等离子体物理学; 表面等离子体激元; Airy 表面等离子体; 光栅耦合; 强局域化

中图分类号: O539 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3298-05

Analysis of characteristics with Airy surface plasmon in SPPs lasing

Zhu Jun^{1,2}, Li Zhiquan²

(1. College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to study on surface plasmon polaritons (SPPs) which have Airy plasma characteristics, the special nature of Airy plasma was analyzed and simulated. Based on the principle of SPPs lasing, the theoretical of Airy plasma eigenstates was analyzed. The nature of Airy plasma on the grating structures of SPPs lasing was studied. The results indicates that the Airy surface plasmon not only have characteristics with amplification in near field energy zoom and fast spread, but also can control spread using its characteristics; Airy surface plasmon can control energy loss only in rang width, which cannot appear Airy surface plasmon when its width is less than 600 nm; lasing energy of different width have same trend; Airy surface plasmon can achieve fast spread in the condition of low excitation energy, it has not obvious effect when increase lasing energy after 2.3 eV. There is a positive significance for studying strong localization of SPPs, surface optical processing with SP and linear control SP of no diffraction.

Key words: plasmon physics; surface plasmon polaritons; Airy surface plasmon; coupling grating; strong localization

收稿日期:2014-02-13; 修订日期:2014-03-15

基金项目:国家自然科学基金(61172044);河北省自然科学基金(F20100002002);国家留学人员科技活动项目择优资助经费

作者简介:朱君(1985-),男,讲师,博士,主要从事表面等离子体光学方面的研究。Email:zhujun1985@mailbox.gxnu.edu.cn

0 引言

新兴微纳光子学领域中的纳米表面等离子体 (SPPs) 学主要研究金属纳米结构中光与物质的相互作用,它具有尺寸小、速度快和克服传统衍射极限等特点,有望成为电子学和光子学在纳米尺度上的重要载体,实现新一代光电技术创新的平台^[1]。1989 年日本 NEC 研究所的 Tomas Ebbesen 发现金膜的表面等离子 (SP) 增强了光波能量的透射,并在 9 年后完成了实验验证^[2],随之 SP 具有的放大电磁场的独特性质不断被应用。加州大学柏克莱分校的 Xiang Zhang 领导的研究团队利用金属-介质的纳米结构形成表面等离子体激元 (SPP) 的准粒子,实现了将光子的波长缩小到衍射极限以下^[3];美国普林斯顿大学的 Stephen 实验发现遮住纳米金属膜上的小孔,不仅挡不住光线,反而会增加透射光的数量^[4]。在 SPPs 领域不断探索期间,研究人员发现 Airy 激光束在金属表面的传播可能会成为开辟其应用的又一方向。Airy 光束具有稳定、普遍存在、无衍射的特性,它通过一个光学系统后,只会被系统线性放大或缩小^[5-10]。自 2007 年 Georg 等人成功利用光栅结构观察到 Airy 激光束后^[11],怎样在 SPPs 的传播和激射中利用 Airy 激光束无衍射、长距离加速传播和自愈能量的性质就成为研究中需要解决的一大课题。文中通过 SPPs 本征态理论分析了 Airy 等离子产生的理论基础,利用 SPPs 激射结构仿真讨论 Airy 等离子体的性质和相关特性。这一研究将为表面光学处理和线性控制无衍射 SP 光学产生积极的作用。

1 Airy 等离子体的理论基础

最近,德国 Laszlo 领导的团队观察到由激光诱导产生比世界上最大粒子加速器产生的电场还强 1000 倍的 SPPs 波(图 1(a))^[12]。一般情况下,SPPs 是光子与自由电子耦合振荡的局域化或准粒子,产生的 SP 场被金属表面所影响,使 SPPs 在金属表面中指数衰减。由光栅耦合 SPPs 激射的结构(图 1(b))和 Airy 等离子体的特性分析可知,尽管 SPPs 传播过程中会有大量的能量损耗,但还是具备了 Airy 等离子产生的基本条件和传播的可能^[13-18]。

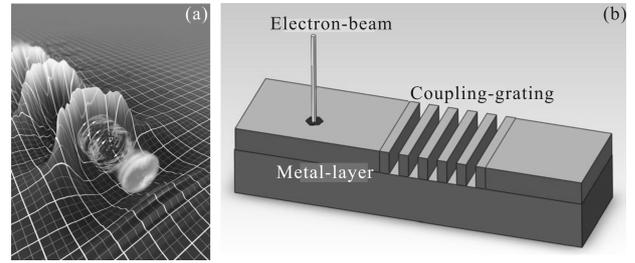


图 1 巨大电场的等离子波和 SPPs 激射的光栅耦合结构

Fig.1 Huge electromagnetic coupling device and SPPs

1.1 SPPs 理论的基础

SPPs 传播中存在的共振态是 Maxwell 方程的本征态,它与金属的组成材料(或表面厚度)无关。产生的共振态场一旦激发就会辐射电磁波到远场区,能量也将消失变成内能。首先讨论一个理想球形介质源的本征值,设介质为半径为 a 的球形面。利用 Maxwell 方程得这一球形的 TE、TM 模矢量关系^[19-20]为:

$$\begin{cases} \text{TE: } \vec{E}_n^{(M)} = P_n^{(M)}(r) \vec{W}_n(\vec{\Omega}) \\ \text{TM: } \vec{E}_n^{(M)} = \frac{i}{\zeta[1-g_n^{(E)} \theta(l-r)]} \nabla \times [P_n^{(E)}(r) \vec{W}_n(\vec{\Omega})] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \vec{W}_n(\vec{\Omega}) = \frac{\vec{L}}{\sqrt{r(r+1)}} \vec{L} = \vec{r} \times \nabla \\ P_n^{(E)}(r) = \begin{cases} A_n^{(E)} j(\zeta r \sqrt{1-g_n^{(E)}}) & r < l \\ B_n^{(E)} h^{(1)}(\zeta r) & r > l \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为阶跃函数; n 为系数; ζ 为介电常数; $j, h^{(1)}$ 分别为球面的 Bessel 函数和 Hankel 函数; $g_n^{(E)}, A_n^{(E)}, B_n^{(E)}$ 为对应方程的一个特解,公式(1)存在无穷数列的解 $x_n^{(F)}$,且解 $x_n^{(F)}, g_n^{(F)}$ 都是复数。如果 $l \rightarrow 0$,则存在唯一的特征值 $\vec{E}_{n=0}^{(M)}(r)$,此为准静态表面等离子共振态。

利用上述球面的 EM 场的解法推广到整个介质区域,可得任一系统本征函数的特征值为:

$$\vec{E}_{mm}(r) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} P_m^{(E)} \vec{E}_n^{(E)}(r) \quad (3)$$

通过对本征态求解推论,金属表面 SPPs 激射形成中存在两条基本对称性质: z 向的旋转对称——确定了离散解系数 n ; 空间反演对称——对应于本征态的奇偶性,即可以构建形成(和取消)奇(偶)同位的偶极子,这就为 Airy 等离子体的产生提供了实现的理论依据。

1.2 Airy 等离子产生的理论分析

分析本征态 EM 场的能量, 由系统中能量守恒可知能量总和应为 0, 再利用本征态理论有:

$$En^{\text{total}} = En_1 + En_2 = \int \zeta(\vec{r}) \cdot |\vec{E}_a(\vec{r})|^2 d^3r = 0 \quad (4)$$

由介电常数可以分析能量的第一部分为: $En_1 \approx \frac{\xi_0}{2} \cdot \frac{d(\omega \text{Re}\zeta)}{d\omega} = \frac{\xi_0}{2} \text{Re}\zeta < 0$, ξ_0 是金属的固定电介质常数。则对应得 $En_2 \approx -\frac{\xi_0}{2} \text{Re}\zeta > 0$ 。采用上述得出的结果有积分方程:

$$\frac{\partial En}{\partial t} + \int (\nabla \cdot S) d^3r = -\omega \xi_0 \int \text{Im}[\zeta(\vec{r}, \omega)] \cdot |\vec{E}(\vec{r}, \omega)|^2 d^3r = -\omega \xi_0 \text{Im}\zeta \quad (5)$$

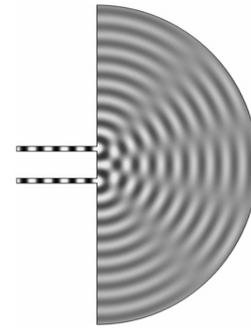
这不仅表明了电磁场能量的作用, 还给出了介质中的损耗。分析式(5)可知, SP 谐振必然会由损耗衰减, 损耗能量与 $\text{Im}\zeta(\omega)$ 成正比, 而产生的 EM 场能量正比于 $\text{Re}\zeta(\omega)$ 。结果同时实现了 Airy 表面等离子形成的有限能量。如采用光栅耦合结构, 产生的 Airy 表面等离子无衍射波由于光栅波长较小散射将会快速衍射, 具备了通过表面狭缝后的自愈性, 即产生无衍射的 Airy 表面等离子可以控制光束的传播。

2 Airy 表面等离子体的仿真分析

2.1 性质的仿真分析

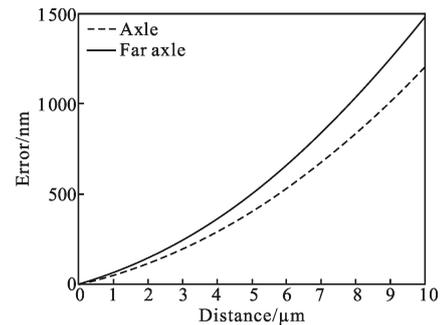
为了验证无衍射 Airy 表面等离子体的激发, 仿真分析等离子体的数量特性。图 2(a)为 Airy 等离子体通过孔隙传播的谱图, 可以看出 Airy 等离子体传播中会有能量增大的过程。图 2(b)为图 1(b)结构中在基底长 $10 \mu\text{m}$ 、宽 800 nm 、光栅厚 240 nm 、长 $3 \mu\text{m}$ 、深 40 nm 时, 对应采用近轴和非近轴近似条件下的离子束传播距离的路径改变的误差值。从图中路径变化的结果可得, 采用非近轴的处理方法对于 Airy 等离子体的性质分析将会更精确。图 2(c)为两种近似处理的 SPPs 在金属表面传播时 Airy 等离子体的半波宽的变化特性。

由图中的半波损耗可知, Airy 等离子体随着传播距离的增大峰值在近场区呈现快速增大的趋势。由上述仿真分析结果可得, 在金属表面产生的 Airy 等离子体具有在近场能量放大和快速传播的特性。这一结果表明, 通过改变结构的参数可实现等离子体传播的变化。



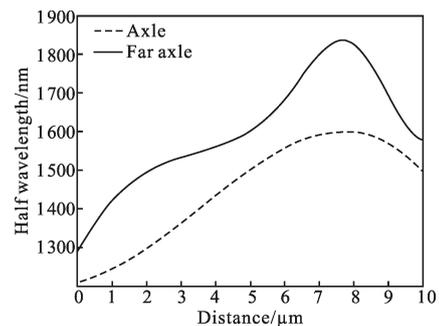
(a) 轨迹

(a) Track



(b) 路径变化关系

(b) Path change relations



(c) 半波长径变化关系

(c) Changes in relationship between half-wavelength path

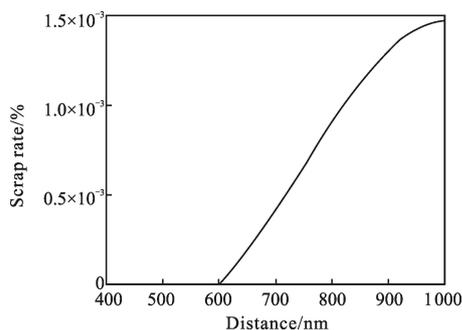
图 2 特性分析曲线

Fig.2 Characteristic curves analysis

2.2 电子能量损耗的仿真分析

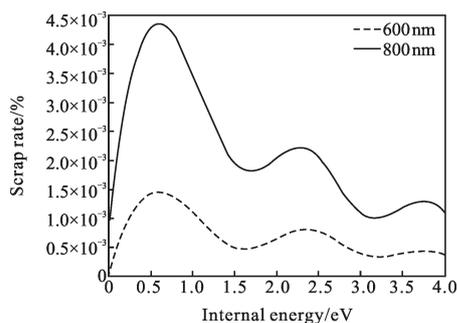
进一步验证 Airy 等离子体的性质。图 3(a)分析的是的基底宽度对产生 Airy 等离子体影响曲线。结果表明: 在基底宽度小于 600 nm 左右时无法出现明显的 Airy 表面等离子, 即 Airy 表面等离子只有在一定宽度下与光激发的相互作用才能抑制能量损耗。图 3(b)分析了基底分别宽 600 nm 和 800 nm 时的电子束激发能量与产生离子数量间的关系, 由图可知: 在不同宽度的基底条件下, 激光能量与产生离子束的趋势

基本一致;且在 2.3 eV 作用时能量的增加对 Airy 等离子体的作用不再明显。这一结果对于 SPPs 激射过程中能量的控制具有一定的价值,且表明了 Airy 表面等离子体在激发能量较小时就能实现快速传播。仿真结果表明 Airy 表面等离子体可以通过结构的参数和激射能量的控制实现其对于 SPPs 激射的应用。这一结果对于 SPPs 的强局域化应用实现具有一定的意义。



(a) 基质宽度

(a) Width of matrix



(b) 电子束激射能量

(b) Lasing energy of electron beam

图 3 电子能量损耗的参数影响曲线

Fig.3 Effect of electron energy loss parameter curves

3 结 论

分析和仿真了在 SPPs 传播中 Airy 等离子体的特殊性质,产生的 Airy 表面等离子体利用其特性可控制光束的传播,且基质在宽度小于 600 nm 左右时无法出现显著的 Airy 表面等离子体,Airy 表面等离子体在 2.3 eV 作用时能量的增加对 Airy 等离子体的作用不再明显,且实现了改变结构的参数可实现等离子体传播的变化。这一研究对于 SPASER^[21]激射装置的进一步发展及半导体设备的纳米等离子体激元耦合都具有一定的意义。

参 考 文 献:

- [1] Lu H, Liu X, Mao D, et al. Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17922–17927.
- [2] Maziar P N, Kevin T, Yeshaiah F. Gain assisted propagation of surface plasmon polaritons on planar metallic waveguides[J]. *Opt Express*, 2004, 12(17): 4072–4079.
- [3] Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M, et al. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric size [J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 13989–13994.
- [4] Chen X, Bhola B, Huang Y, et al. Multi-level multi-thermal-electron FDTD simulation of plasmonic interaction with semiconducting gain media: applications to plasmonic amplifiers and nano-lasers [J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17220–17238.
- [5] Liu L, Hao X, Ye Y, et al. Systematical research on the characteristics of a vertical coupled Fabry-Perot plasmonic filter[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10): 2558–2562.
- [6] Zhu P S, Hao F, Jay G. SPPs coupling induced interference in metal/dielectric multilayer waveguides and its application for plasmonic lithography [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12521–12529.
- [7] Polman A. Plasmonics applied[J]. *Science*, 2008, 322(5903): 868–869.
- [8] Bolzoni M P, Gentili G G, Pietralunga S M. LR-SPP mode cutoff in strip waveguides as affected by technologically induced asymmetries: a numerical study [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(15): 1082–1084.
- [9] Liu F, Li Y X, Wan R Y, et al. Hybrid coupling between long-range surface plasmon polariton mode and dielectric waveguide mode [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 16(13): 9378–9390.
- [10] Xiao G, Wang X, Zhou Z P. Propagation properties of symmetric surface plasmon polaritons mode in Au/Al₂O₃/Au waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 628–630.
- [11] Rao R J, Tang T T. Study on active surface plasmon waveguides and design of a nanoscale lossless surface plasmon waveguide [J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2011, 28(5): 1258–1265.
- [12] Berini P, De L I. Surface plasmon-polariton amplifiers and lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(1): 16–24.
- [13] Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and Applications:

- Fundamentals and Applications [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [14] Arakawa E T, Williams M W, Hamm R N, et al. Effect of damping on surface plasmon dispersion [J]. *Physical Review Letters*, 1973, 31(18): 1127.
- [15] Berini P. Figures of merit for surface plasmon waveguides [J]. *Optics Express*, 2006, 14(26): 13030–13042.
- [16] Plotz G A, Simon H J, Tucciarone J M. Enhanced total reflection with surface plasmons [J]. *J Opt Soc Am*, 1979, 69(3): 419–421.
- [17] Sudarkin A N, Demkovich P A. Excitation of surface electromagnetic waves on the boundary of a metal with an amplifying medium [J]. *Sov Phys Tech Phys*, 1989, 34: 764–766.
- [18] Avrutsky I. Surface plasmons at nanoscale relief gratings between a metal and a dielectric medium with optical gain [J]. *Physical Review B*, 2004, 70(15): 155416.
- [19] Li Zhiquan, Zhu Jun, Niu Liyong, et al. Analysis on SPP pulse rectifier producing THz electromotive force[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2346–2350. (in Chinese) 李志全, 朱君, 牛力勇, 等. 表面等离子激元脉冲整流产生太赫兹电动势[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2346–2350.
- [20] Zhu Jun, Li Zhiquan. Integrated device of lasing SPPs with coupling grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1899–1903. (in Chinese) 朱君, 李志全. 光栅耦合的可集成表面等离子体激射装置[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1899–1903.
- [21] Dorfman K E, Jha P K, Voronine D V, et al. Quantum-coherence-enhanced surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(4): 043601.