

文章编号 1004-924X(2012)09-1899-05

光栅耦合的可集成表面等离子体激射装置

朱 君*, 李志全

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为了能够更有效地调节和产生表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)的激射,设计了一种光栅耦合的可集成 SPPs 激射装置,利用电子束激发和光栅耦合方式实现了 SPPs 在无源金属层中的传播和激射。分析了该装置 SPPs 传播的波矢特性,通过某一条件下激射条件和光照波长的分析得出了结构的一般特性。结果表明:基于光栅耦合结构的装置产生的 SPPs 激射具有显著的强局域特性,通过控制注入电子束强度可有效调节 SPPs 的激射,该装置可在光照波长 710 nm 左右的可见光范围实现有效的 SPPs 传播。该装置的研制对于构建等离子体单元电路,探测纳米线结构和纳米级飞秒光学场极有意义。

关键词:等离子体物理学;表面等离子体激元;光栅耦合;强局域化

中图分类号:O539;TN252 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.1899

Integrated device of lasing SPPs with coupling grating

ZHU Jun*, LI Zhi-quan

(College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding author, E-mail: zhujun1985810@sohu.com

Abstract: To control the lasing of Surface Plasmon Polaritons (SPPs) more effectively, an integrated device of lasing SPPs based on a coupling grating was researched and the propagation and lasing of the SPPs in passive metal layers were realized by electron beam exciting and grating coupling. The characteristics of wave vector for the SPPs propagation were analyzed and the general characteristics of the device were obtained through the analysis of lasing condition and light wavelength under a special condition. Results indicate that the device to complete the SPPs lasing based on the coupling grating has an obvious strong local characteristics, and it can control the lasing SPPs effectively by adjusting the intensity of injecting electron beam. The device can propagate the SPPs well when it is in the range of visible light wavelength. The device has a positive significance for researching the construction of plasmon cell circuit, the detection of nano-wire structure and the explosion of nano-optical field.

Key words: plasmon physics; Surface Plasmon Polaritons(SPPs); coupling grating; strong localization

收稿日期:2012-03-28;修订日期:2012-05-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60877047);河北省自然科学基金资助项目(No. F20100002002);国家留学人员科技活动择优资助项目(No. 20070216004)

1 引言

早在 1950 年,表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)由 Ritchie 提出而被人们所认识,本质上将它定义为横向电磁场和金属表面自由电子相互作用的一种电磁场模式,或认为自由电子和光波电磁场由于共振频率相同而形成的一种集体振荡态^[1-4]。由于 SPPs 具有在亚波长结构中对光进行操控的光子学和电子学的特点,一直被认为是将来最有希望作为集成光子器件的信息载体。但是在微纳结构应用之前,SPPs 的研究一直处于缓慢发展之中。随着集成光子学和微纳加工技术的不断发展,SPPs 的激发和利用金属材料实现 SPPs 的传播逐步成为现实,这使得 SPPs 再次成为研究热点。近年来,SPPs 的应用有了许多新进展:如在集成等离子学方面,SPPs 的光学特性可提供限制光的亚波长大小的技术,这样就解决了衍射极限的问题;SPPs 强局域的特性,已在高速信息技术中的高密度带宽和信息信号处理当中得到了应用^[5-11]。现阶段,SPPs 的激发和传播依然主要是通过光学方法完成,即光照在金属表面-空气的间隙,利用透镜耦合提供能量来实现。经过深入研究发现,耦合技术成为了 SPPs 通往高集成光电子学研究的又一道门槛,这一障碍体现在怎样激射有效的 SPPs 到无源金属表面区域,由于无源金属等离子波导对于高局域等离子波有着如纳米线结构和近场光学孔径等多种实际应用,因此这一问题的解决显得尤为重要。研究人员尝试过构造特殊棱镜耦合的方法来激发 SPPs,但很难实现 SPPs 发生器的有效调节和控制^[12-14]。本文设计了可集成的微纳装置,利用电子束激发、光栅耦合的方式来实现 SPPs 在无源金属层的传播和激射。该装置对于构建等离子单元电路和纳米光学技术的研究有一定的意义。

2 装置的基本结构和波矢分析

2.1 基本结构的研制

SPPs 传播到无源结构时,在无耦合器的 SPPs 激射装置中,电子束通过金属表面失去部分能量后,会由于没有可用调谐光的作用而在 SPPs 形成后无法进一步激射;当存在耦合器时,可以使

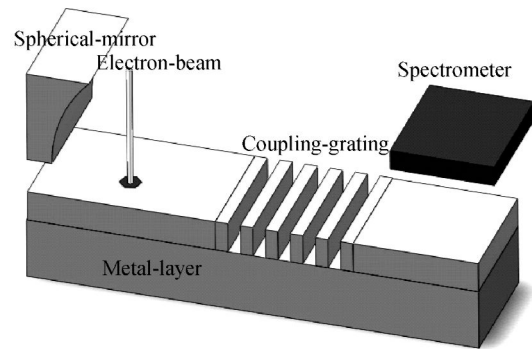


图 1 注入电子束和光栅耦合的方法激发 SPPs 的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of lasing SPPs device through injection of electron beams and coupling grating

金属表面产生反向传播的 SPPs, 即有 $+k_{\text{spp}}$ 和 $-k_{\text{spp}}$ 一对波矢, 这使形成的 SPPs 会继续激射^[15-17]。本文设计的装置(图 1)采用制作金属光栅耦合器的结构来实现 SPPs 激射: 首先向金属表面注入一束自由电子以等价于半导体激光源的作用, 接着由光照空气-金属表面实现光学增益, 然后, 使 SPPs 传播到无源部分(带有金属光栅结构的部分), 接着通过光栅耦合作用完成无源结构中 SPPs 激射。在装置的上部给出了一种解耦光, 由光谱仪和抛物型金属球面镜结构实现光谱的分析集合。装置的金属衬底可通过光刻成型的方式实现, 其长度(几十微米)远小于 SPPs 的衰减长度, 光栅的占空比在 50% 左右更有益于耦合作用。分析装置结构本身可知, 它对于激发 SPPs 波矢和无源装置的应用具有一般性和可控性。

2.2 SPPs 传播过程中波矢的分析

设图 1 结构中的金属光栅耦合的光波波矢为 k_{cou} , 利用光栅耦合特性可知耦合作用过程应满足方程:

$$\frac{\omega}{c} \sin(\partial(\omega)) + A \text{Re}\{k_{\text{cou}}(\omega)\} = \text{Re}\{k_{\text{spp}}(\omega)\}. \quad (1)$$

其中: 正整数 A 为衍射级, ∂ 为衍射角度, ω , c 分别为频率和光速。式(1)还可用来计算耦合后不同衍射级对应的波长峰值。分析电子束激励源的波矢可得:

$$\begin{cases} \text{Re}\{k_e(\omega)\} = (2\pi/\lambda) n_e \\ v_e = c/\lambda \end{cases} \quad (2)$$

其中: v_e 为电子束注入的速度, k_e 为电子束等价于半导体激光器的波矢, λ 为波长, n_e 为等价折射率。

由式(1)和(2)的结果,利用耦合作用可得 SPPs 传播过程中的波矢和耦合光栅的周期 p 须同时满足:

$$\begin{cases} k_e = k_{spp} + k_{cou} \\ \text{Re}\{k_e(\omega)\} - \text{Re}\{k_{spp}(\omega)\} = \frac{2\pi}{p} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)、(2)、(3)和光栅耦合基本性质分析产生的等离子谐振,可得:

$$\begin{cases} B \frac{\text{Re}\{k_{cou}(\omega)\}}{2} = \text{Re}\{k_{spp}(\omega)\} \\ \omega \text{Re}\left\{\left[\frac{\xi(\omega)}{1+\xi(\omega)}\right]^{\frac{1}{2}}\right\} = c \text{Re}\{k_{spp}(\omega)\} \end{cases} \quad (4)$$

其中:正整数 B 是谐振级数, $\xi(\omega)$ 为金属介电参数。由式(4)可得不同光波频率(波长)条件下对应的谐振级 B 值,从而得出 SPPs 传播中的谐振谱。分析式(4)可知,SPPs 在实现耦合光的过程中对传播和激励波矢的有效性具有选择性,耦合光栅在耦合作用的同时对电子束的激励也会产生抑制作用。

3 结构的仿真验证和分析

3.1 SPPs 激射中 k_e 和 k_{spp} 的分析

在 SPPs 早期研究的飞秒荧光实验中发现,当电子穿过金属表面时,金属表面会产生瞬态偶极子以致反向充电,从而造成大量能量损失,无法形成有效的 SPPs,这说明了激励波矢在 SPPs 的传播过程中至关重要^[18]。图 2 分析了

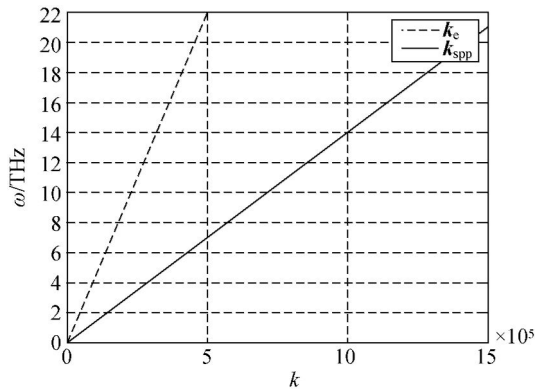


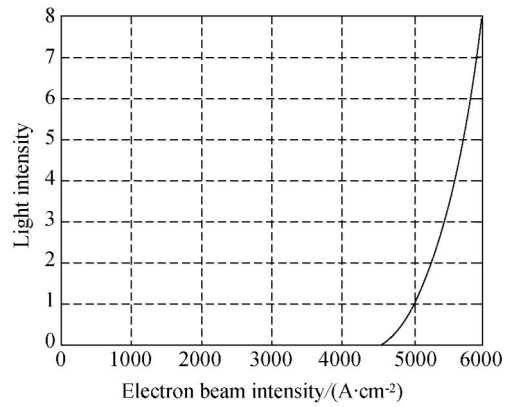
图 2 k_e 和 k_{spp} 与频率的线性关系

Fig. 2 Linear relationship between k_e , k_{spp} and frequency, respectively

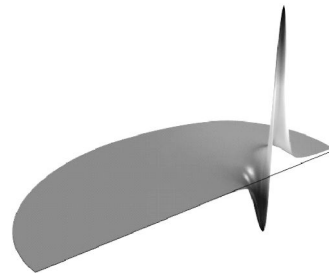
SPPs 过程中的 k_e 和 k_{spp} 分别与频率的基本关系,图中的线性关系验证了式(3)函数关系的正确性,由此可知装置可通过调节光栅周期来控制波矢,从而实现 SPPs 更有效地传播到无源结构。

3.2 特定条件下 SPPs 激射的分析

利用图 1 给出的装置和理论分析中的波矢特性对 SPPs 激射进行更详细的分析。图 3(a)给出了在室温,金属表面长 $10 \mu\text{m}$,光栅长 $3 \mu\text{m}$ 、深 40nm 条件下注入的电子束强度与光强度的关系,图(b)为对应的 SPPs 激射的谱图。



(a)



(b)

图 3 (a)电子束强度与光强度间的关系;(b)对应条件下 SPPs 激射的谱图

Fig. 3 (a) Relationship between injection of electron beams and light intensity (b) Lasing spectra corresponding to (a)

分析图 3 可知,由图 3(a)得电子束密度在 $4\ 500 \text{ A/cm}^2$ 左右时 SPPs 开始激射,即此时达到了激射阈值;电子束激励产生 SPPs 后呈指数上升的曲线形式,说明了这一过程仍然是 SPPs 混合模式的传播,同时表明在有源区和光学增益下,装置具有 SPPs 传播到无源区后无较大衰减的特

点,即装置更易实现无源金属结构的激射;由图 3(b)可知 SPPs 传播过程具有明显的等离子强局域特性。如果采用归一化频率的方式,可以计算得出 SPPs 混合模式,进而用来分析 SPPs 的激射模式和激射条件。由分析条件的一般性可知,只要研制装置的基本结构确定,就可通过注入电子束的阈值特性来分析 SPPs 的传播特性。

3.3 SPPs 激射中光波波长的分析

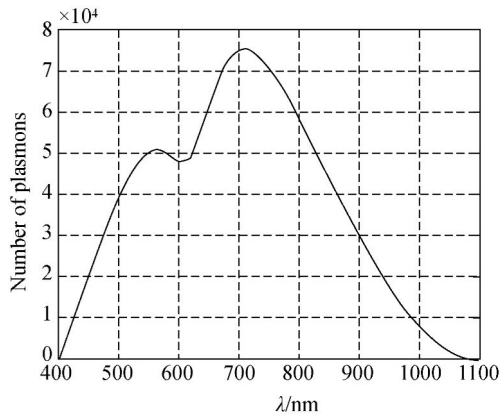


图 4 不同光照波长 λ 与产生离子数量 I_n 间的函数关系

Fig. 4 Curve of light wavelength λ vs. number of plasmons

在获得 SPPs 激射到无源结构后,进一步分析光照波长对 SPPs 传播的影响。图 4 给出了在 3.2 所述条件下,光照波长 λ 与产生等离子数量间的函数关系。由图可知:在光照波长较短和较长的情况下等离子数量明显偏低,即在电子束激励产生 SPPs 后耦合作用效果偏低,这样将很难进一步形成等离子波;在 710 nm 左右时等离子数振荡达到峰值,说明这一光照波长下 SPPs 的传播最有效;等离子数量的振荡和曲线斜率偏大说明 SPPs 传播中光散射造成的损耗影响不大。综上可知,装置在可见光范围内就可实现高效的 SPPs 激射,该装置的应用具有很大的潜力。

4 结 论

本文研制了一种光栅耦合的可集成 SPPs 激射装置,分析了该装置传播的 SPPs 波矢特性,并验证了结构中产生 SPPs 激射具有明显的强局域特性,装置具有调节 SPPs 传播的作用和在可见光范围实现高效激射的特性。激射装置具备可集成化光学器件的基本特性,其应用对于纳米线结构、纳米级飞秒光学场的探测,半导体设备的纳米等离子激元耦合都具有一定的意义。

参考文献:

- [1] RITCHIE R H. Plasma losses by fast electrons in thin films[J]. *Phys. Rev.*, 1957,106(5):874-881.
- [2] POWELL C J, SWAN J B. Origin of the characteristic electron energy losses in aluminum[J]. *Phys. Rev.*, 1959,115(4):869.
- [3] 雷建国,刘天航,林景全,等.表面等离子体激元的若干新应用[J]. *中国光学与应用光学*,2010:432-439.
LEI J G, LIU T H, LIN J Q, *et al.*. New applications of surface plasmon polaritons [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010: 432-439. (in Chinese)
- [4] 李娜,倪晓昌,王彬.表面等离子体激元研究进展[J]. *天津工程师范学院学报*,2010,4:18-23
LI N, NI X CH, WANG B. Research progress of surface plasmon polaritons[J]. *Journal of Tianjin University of Technology and Education*, 2010,4: 18-23. (in Chinese)
- [5] Plasmon-polariton emission from a coherently excited quantum dot near a metal interface [J]. *Phys. Rev. B*, 2012,85(10):125301.
- [6] WOOD J J, TOMLINSON L A, HESS O, *et al.*. Spoof plasmon polaritons in slanted geometries[J]. *Phys. Rev. B*, 2012,85(10):075441.
- [7] CUCHE A, MAHBOUB O, DEVAUX E, *et al.*. Plasmonic coherent drive of an optical trap [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108:026801.
- [8] ZENG X D, XU J P, YANG Y P. Spontaneous emission interference enhancement with a μ -negative metamaterial slab[J]. *Phys. Rev. A*, 2011,84(10): 033834.
- [9] 黄德修,刘雪峰.半导体激光器及其应用[M].长沙:国防工业出版社,1999.
HUANG D X, LIU X F. *Semiconductor Laser and Applications*[M]. Changsha: National Defence Industry Press 1999. (in Chinese)
- [10] STOCKMAN M I. The spaser nanoscale quantum generator and ultrafast amplifier[J]. *Journal of*

- Optics*, 2010, 12: 13-15.
- [11] 樊志华,王春鸿,姜文汉. 基于累加器的哈特曼-夏克波前斜率处理器[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 501-506.
FAN ZH H, WANG CH H, JIANG W H. Accumulator-based wavefront slope processor for Shack-Hartmann sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 501-506. (in Chinese)
- [12] STOCKMAN M I. Spaser action, loss compensation, and stability in plasmonic systems with gain [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106: 156802-1-156802-4.
- [13] 高光宇. 表面等离子激元相干性的研究[D]. 天津:南开大学, 2010.
GAO G Y. *The study of coherence of surface plasmon polaritons*[D]. Tianjin: Nankai University, 2010. (in Chinese)
- [14] WIERSMA D S, NOGINOV W M. Nano and random lasers[J]. *Journal of Optics*, 2010, 020201(12):2-3.
- [15] SHEPHERD H J, BONNET S, GUIONNEAU P, *et al.*. Pressure-induced two-step spin transition with structural symmetry breaking: x-ray diffraction, magnetic, and Raman studies[J]. *Phys. Rev. B.*, 2011, 84(10):144107.
- [16] 葛袁静,张广秋,陈强,等. 离子体科学技术及其在工业中的应用[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2007.
GE Y J, ZH G Q, CHEN Q. *Plasma Science Technology and Its Application in Industry*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [17] WIERSMA D J, NOGINOV M A. Nano and random lasers[J]. *Journal of Optics*, 2010, 020201(12):2-3.
- [18] BERGMAN D J, STOCKMAN M I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystem[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(2):027402-1-027402-4.

作者简介:



朱 君(1985—),男,江西鹰潭人,博士研究生,主要从事非线性光电检测技术,表面等离子体学方面的研究。E-mail: zhujun1985810@sohu.com



李志全(1954—),男,河北秦皇岛人,博士生导师,2000年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事非线性光电检测技术,光纤传感与通信,光学薄膜技术的研究。E-mail: lzq54@ysu.edu.cn