

纳米三明治结构光子超材料中电磁场振荡行为研究*

付非亚 陈 微 周文君 刘安金 邢名欣 王宇飞 郑婉华[†]

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2010 年 1 月 22 日收到; 2010 年 6 月 4 日收到修改稿)

对金属-介质-金属的三层纳米三明治结构中的磁性等离子体模式特性进行了时域有限差分数值计算分析, 并给出该类谐振器的品质因数变化规律. 基于纳米三明治结构中的磁性等离子体模式对该种结构进行设计, 研究几何构型参数以及介质材料折射率对磁性等离子体模式的调控规律. 以电感电容等效电路近似理论对纳米三明治结构磁性等离子体模式谐振频率的变化规律进行理论解释, 理论解释与数值计算结果符合很好. 同时还研究了纳米三明治谐振器对电磁能量的限制, 并从热和辐射两方面分析了该类结构的品质因数变化情况, 可为基于磁性等离子体模式的新型波导及激光器结构的设计提供指导.

关键词: 纳米三明治结构, 磁性等离子体模式, 超材料, 磁性共振

PACC: 4270Y, 4260D, 4270Q

1. 引 言

贵金属纳米单元制作的亚波长超材料结构吸引了学术界的广泛关注^[1-4]. 由于这些纳米单元结构的表面等离子体共振耦合作用, 电磁场被强烈地限制在结构周围, 这些结构甚至可以克服衍射极限尺度, 在集成光学中拥有应用的潜在可能性. 在磁性共振频率附近, 超材料的磁导率以及介电常数均可实现负值, 这在光学波段内实现亚波长尺度负折射材料提供了可能性. 到目前为止, 研究人员引入了多种新型超材料结构来实现磁性共振, 例如鱼网结构、纳米柱状对结构、开口环谐振器结构^[5]、纳米三明治结构等. 研究表明, 负的磁导率甚至负的折射率可在鱼网结构和纳米三明治结构中得以实现^[6-8]. 基于单个开口环的谐振器结构以及单个纳米三明治结构中激励的磁性等离子体(MP)已经得以实现^[9,10], 以 MP 方式进行能量振荡的优势在于低的辐射损耗和更长的传播长度. 相比之下单个开口环谐振器结构在高频时将会出现磁性响应饱和, 同时存在结构复杂、开口环开口尺寸微小的制作工艺难题, 而纳米三明治结构可工作在更高频段、实现工艺简单, 因而成为关注的焦点.

本文研究了纳米三明治结构中激励产生 MP 共振模式的电场、磁场的产生以及能量分布, 并深入研究了 MP 共振模式谐振波长的调控变化规律, 将纳米三明治几何构型、中间层介质材料折射率的改变对谐振波长的调控归结为对等效 LC 电路中等效电感 L 与等效电容 C 的调整, 给出了 MP 模式谐振波长的调控规律和理论解释. 最后对 MP 模式品质因数 Q 进行了计算和分析.

2. 模型及计算方法

MP 共振发生在结构尺寸小于光学波长量级的纳米结构中, MP 模式的振荡特性主要由金属材料特性与纳米结构几何构型决定, 而受结构尺寸制约较少. 纳米三明治结构尺寸小于结构辐射波长, 将对激励电磁场中的磁场分量产生强烈的共振响应. 在该类结构中并没有自由的磁极, 但位移电流将导致磁偶极矩的产生, 进而产生类似条形磁铁的效果, 类似于纳米结构中激励产生的电性等离子体^[11], 纳米三明治结构可以在相应的频率范围内有效支持 MP 振荡. 图 1 给出纳米三明治结构的几何构型, 纳米三明治结构为金属-介质-金属的三层结构, 圆形金属层直径为 c , 上下金属层厚度均为 a , 介

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA03Z410)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB921705)和国家自然科学基金(批准号:60677046)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: whzheng@semi.ac.cn

质层厚度为 b . 当金属材料为金时, 色散关系服从德鲁德色散关系, 色散参数^[12] $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}$ rad/s, $\omega_r = 40.69 \times 10^{12}$ rad/s, 结构周围环境为真空. 在该结构外部加一平行于介质层的磁场激励源, 在纳米三明治结构中激励起磁场响应, 激励源设置磁场偏振方向为 $-z$ 方向, 电场偏振方向为 y 方向, 如图 1 所示. 对 $c = 200$ nm, $a = 50$ nm, $b = 50$ nm, 金属层之间的介质材料折射率为 3.5 的纳米三明治结构监测响应磁场的 z 分量, 在波长 $\lambda = 1749$ nm 处磁场响应达到峰值, 产生磁性共振, 共振模式场强度分布如图 2 所示, 强度值为模式场强度与激励源强度之比 E/E_0 .

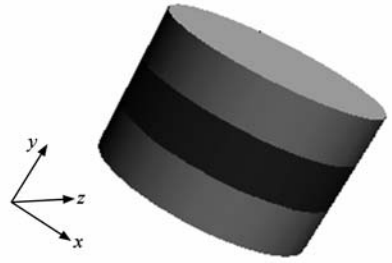


图 1 纳米三明治结构的几何构型

比 E/E_0 .

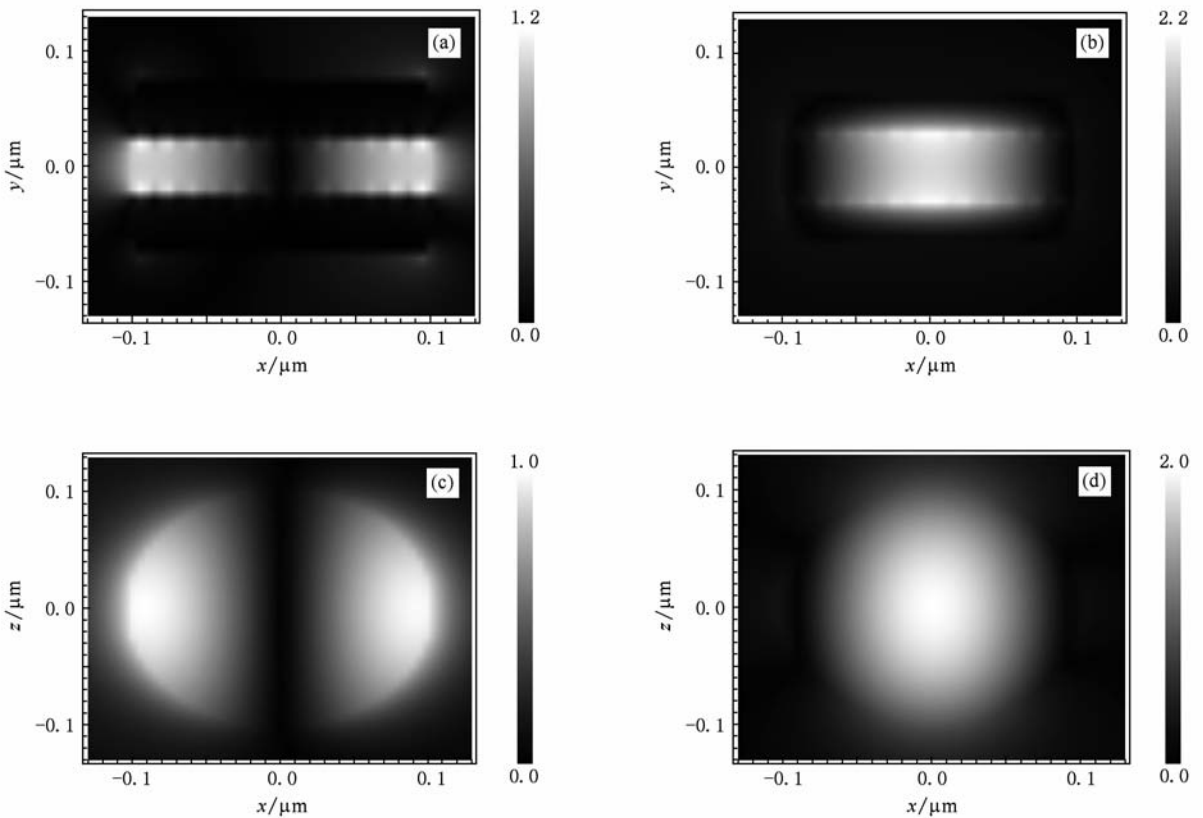


图 2 MP 模式场分布 (a) $z=0$ 平面电场分布, (b) $z=0$ 平面磁场分布, (c) $y=0$ 平面电场分布, (d) $y=0$ 平面磁场分布

当产生磁性共振时, 电磁场能量主要集中在上下金属层之间的介质层中, 因此这样的结构可以看作一种限制光场的腔结构. 磁性振荡模式的一个重要特征为电磁场激励下的感生电流将形成环流, 并将很强的磁场响应限制其中. 磁性共振产生后, 两金属层将会产生方向相反的感生电流, 磁场主要集中在两金属层之间的介质层中. 由于极性相反的电荷在上下金属层边缘的积累, 电场主要集中在中间介质层的边缘, 电场呈偶极双瓣状对称分布在

介质层内部边缘.

3. 计算结果及分析

3.1. MP 模式谐振波长调控

首先, 我们通过对纳米三明治几何构型参数的调整来实现 MP 模式谐振波长的调控. 保持结构参数 $a = 50$ nm, $c = 200$ nm 不变, 取参数 b 分别为 50,

100, 200, 250 nm, 并以相同的激励源对系列结构进行激励, 可得 MP 模式谐振波长的变化趋势如图 3 (a) 所示. 从图 3 (a) 可以看出, 随着中间介质层厚度 b 的增加, MP 模式的谐振波长 λ 呈减小趋势, MP 模式产生蓝移.

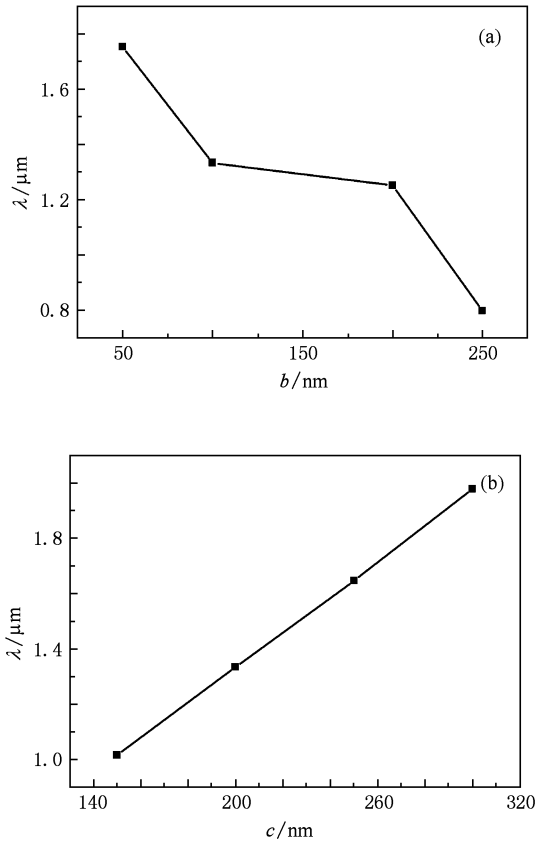


图 3 MP 模式谐振波长 λ 随纳米三明治结构中间介质层厚度 b 和直径 c 的变化 (a) λ 随 b 的变化, (b) λ 随 c 的变化

保持结构参数 $a = 50$ nm, $b = 50$ nm 不变, 取金属层直径 c 分别为 150, 200, 250, 300 nm, 并以相同的激励源对系列结构进行激励, 计算可得 MP 模式谐振波长的变化趋势如图 3 (b) 所示. 从图 3 (b) 可以看出, 随直径 c 的增加, MP 模式的谐振波长 λ 呈增大趋势, MP 模式产生红移.

改变纳米三明治中间介质层的折射率 (即采用不同的材料作为纳米三明治结构的中间介质层) 以实现 MP 模式谐振波长的调控, 研究 MP 模式谐振波长 λ 的变化趋势.

保持结构参数 $a = 50$ nm, $b = 50$ nm, $c = 200$ nm 不变, 取中间介质层折射率 n 分别为 2, 2.5, 3, 3.5, 并以相同的激励源对系列结构进行激励, 可得 MP 模式谐振波长的变化趋势如图 4 所示. 从图 4 可以

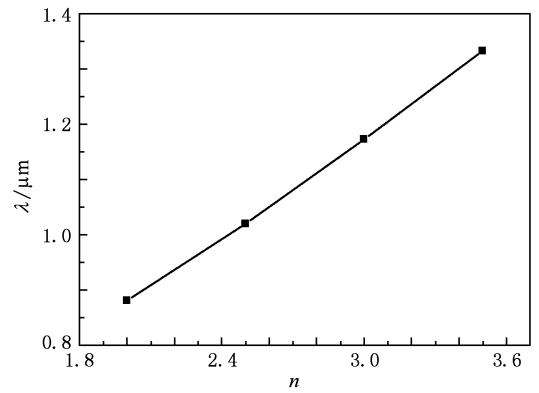


图 4 MP 模式谐振波长 λ 随三明治结构中间介质层折射率 n 的变化

看出, 随着折射率 n 的增加, MP 模式的谐振波长 λ 呈增大趋势, MP 模式产生红移. 通过对几何结构参数 a, b, c 以及中间介质层折射率 n 的调整可以实现对相应 MP 模式谐振波长的调控, 这里只对结构参数 b, c , 材料折射率 n 进行单一参数的调整, 同时调整多个参数可对 MP 模式进行更加精细的调控, 能够为基于 MP 模式的波导结构以及新型激光器^[13]等器件设计提供指导和支持.

我们也对 MP 模式谐振波长的调控进行了理论分析. 结合图 2 中磁场、电场在纳米三明治结构中的限制分布情况, 可将纳米三明治结构近似看作 RLC 等效电路, 由于电阻 R 不制约等效电路中谐振频率的变化, 在磁性谐振频率附近等效电路可简化成如图 5 (b) 所示的 LC 电路. 极性相反的电荷在上下金属层边缘积累, 电场集中在两金属层中间介质层的边缘, 纳米三明治结构上下金属层被中间介质层分开形成等效电路中等效电容 C_m ; 两金属层产生方向相反的感生电流, 进而感生磁场主要集中在两金属层中间的介质层中, 单个金属层由于电流感生磁场可视为等效电感 L_m . 根据电感和电容的定义式

$$L = \frac{N\Phi}{i},$$

$$C = \varepsilon \frac{S}{d},$$

该等效电路总电感可近似表示为

$$L = 2L_m \approx A\mu(ac/c),$$

总电容可近似表示为

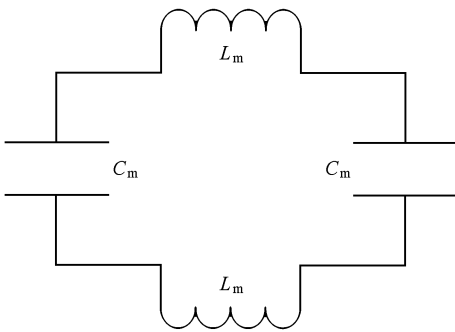
$$C = C_m/2 \approx B\varepsilon(c^2/b).$$

这里 A 和 B 均为常系数. 求解等效电路阻抗方程可知该等效 LC 电路的谐振频率为

$$f = 1 / (2\pi \sqrt{L_m C_m}) \approx 1 / (2\pi \sqrt{AB\mu\varepsilon(ac^2/b)}) . \quad (1)$$



(a)



(b)

图5 纳米三明治结构及其等效 LC 电路 (a) 纳米三明治结构主视图, (b) 等效 LC 电路图

由公式(1)可知, 纳米三明治结构 MP 模式谐振波长随结构参数 b 的增加而产生蓝移, 随结构参数 c 以及中间介质层折射率 n 的增加而产生红移, 这与以上的计算结果相符. 对纳米三明治几何构型参数以及中间介质层折射率的调整可归结为对 LC 等效电路中电感量和电容量的调整, 从而实现了谐振波长的变化. 这可解释以上 MP 模式谐振波长调控的机理.

3.2. 三明治结构振荡器品质因数分析

针对上述不同结构参数 b 和 c 的两组纳米三明治结构, 我们分别计算了 MP 模式的品质因数 Q , 结果如表 1、表 2 所列.

表1 介质层不同层厚 b 对应的 Q 值

b/nm	50	100	200	250
Q	50.1	36.2	19.9	18.1

由表 1 可知, 当纳米三明治结构中间介质层层厚 b 由 50 nm 增加到 250 nm 时, MP 模式的 Q 值由

50.1 下降到 18.1.

表2 金属层不同直径 c 对应的 Q 值

c/nm	150	200	250	300
Q	31.7	36.0	38.3	44.9

由表 2 可知, 当纳米三明治结构金属层直径 c 由 150 nm 增加到 300 nm 时, 结构 MP 模式的 Q 值由 31.7 增加到 44.9.

RLC 等效电路品质因数 Q 与等效电路的等效电阻 R 呈现出负相关特性, 即

$$Q \propto 1/R.$$

同时由于纳米三明治结构是辐射体, 将会持续地向外部空间泄漏其振荡能量, 因而等效电路的等效电阻可分为欧姆热电阻 R_L 和辐射电阻 R_R , 纳米三明治结构模式品质因数由该两种因素综合制约. 介质层层厚 b 增加, 有效电容下降, 即纳米三明治结构对电磁场能量的存储和限制能力下降, 辐射电阻 R_R 项增长, 导致模式品质因数下降. 增加金属层直径 c 相当于增加了 RLC 等效电路的导线横截面积和导线长度, 同时等效电容极板面积增大, 横截面积增加使 R_L 项减弱, 导线长度增加使 R_L 增长, 而等效电容的增加使 R_R 项减弱, 综合作用的结果是等效电阻的减弱占据优势, 纳米三明治结构模式品质因数随参数 c 的增加呈现微弱增加的趋势. 中间介质层折射率 n 的变化对 Q 值的影响同样归结为 R_R 项对 Q 值的制约.

该类纳米三明治结构 MP 模式 Q 值较低, 这与金属材料的吸收损耗直接相关联, 但从表 1 数据可知, 在 $b = 50$ nm 相对较小的介质材料层层厚参数下, MP 模式可以拥有相对较高的品质因数 ($Q = 50.1$), 纳米三明治结构上下金属层可将 MP 模式很好限制住 (见图 2). 基于磁性振荡的 MP 模式甚至可以使该类结构在克服衍射极限的尺度范围内具有相对较大的 Q 值以及对模式场的良好限制. 基于该类等离子体模式特性, 我们可以通过采用高增益的介质层来补偿金属材料的吸收损耗以实现特定器件的性能要求, 同时保持器件所要求的尺寸. 这将为新型高集成化的光电子器件的研制提供理论指导.

4. 结 论

从以上分析可知, 金属-介质-金属的纳米三明治结构在一定的激励条件下将产生磁性共振的 MP

模式. 通过对纳米三明治结构几何构型参数以及中间介质层折射率(即材料种类)的调整可以实现对 MP 共振模式谐振波长的红移或蓝移的调控以及谐振波长的精确选取, 并对谐振波长调控机理给出了相应的解释. 基于 MP 模式振荡的该微型谐振器

结构可以在克服衍射极限的尺寸范围内对电磁场模式进行局域限制, 极低的品质因数缺陷可以通过介质材料的增益特性进行补偿. 本文的工作为 MP 模式谐振波长调控以及基于 MP 模式的新型激光器设计提供了指导.

- [1] Citrin D S 1995 *Opt. Lett.* **20** 901
- [2] Weber W H, Ford G W 2004 *Phys. Rev. B* **70** 125429
- [3] Wang S M, Li T, Liu H, Wang F M, Zhu S N, Zhang X 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 233102
- [4] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Wang J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1025
- [5] Yang Y M, Qu S B, Wang J F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1031 (in Chinese) [杨一鸣、屈绍波、王甲富、徐卓 2009 物理学报 **58** 1031]
- [6] Zhang S, Fan W, Panoiu N C, Malloy K J, Osgood R M, Brueck S R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 137404
- [7] Yuan H K, Chettiar U K, Cai W, Kildishev A V, Boltasseva A, Drachev V P, Shalaev V M 2007 *Opt. Express* **15** 1076
- [8] Dolling G, Enkrich C, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2006 *Science* **312** 892
- [9] Liu H, Genov D A, Wu D M, Liu Y M, Steele J M, Sun C, Zhu S N, Zhang X 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 243902
- [10] Dolling G, Wegener M, Schadle A, Bureger S, Linden S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 231118
- [11] Prodan E, Radloff C, Halas N J, Nordlander P 2006 *Science* **302** 419
- [12] Ordal M A, Bell R J, Alexander R W, Long L L, Querry M R 1985 *Opt. Soc. Am.* **24** 4493
- [13] Zhu Z H, Liu H, Wang S M, Li T, Cao J X, Ye W M, Yuan X D, Zhu S N 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 103

Electromagnetic resonance in nanosandwich photonic metamaterial*

Fu Fei-Ya Chen Wei Zhou Wen-Jun Liu An-Jin Xing Ming-Xin Wang Yu-Fei Zheng Wan-Hua[†]

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(Received 22 January 2010; revised manuscript received 4 June 2010)

Abstract

The magnetic plasmon (MP) modes in metal-dielectric-metal nanosandwich structures are investigated numerically using finite-difference time-domain method. We demonstrate the law of the quality factor in this kind of resonator. According to the MP modes in the nanosandwich structures, we design a series of resonators of this kind in order to investigate how to tune the resonant frequencies of MP modes through tuning the geometrical parameters and the dielectric layer refractive index of resonators, and the obtained result is well consonant with our analysis by the equivalent inductance capacitance circuit. We also investigate the electromagnetic energy confinement of the nanosandwich resonators, and analyse the Q factors of these structures from thermal and radiant points of view, which will guide one in designing new waveguides and lasers based on MP modes.

Keywords: nanosandwich structures, magnetic plasmon modes, metamaterial, magnetic resonance

PACC: 4270Y, 4260D, 4270Q

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z410), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB921705) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677046).

[†] Corresponding author. E-mail: whzheng@semi.ac.cn