

平面金属等离激元超材料对光学 Tamm 态及相关激射行为的增强作用

张振清 路海 王少华 魏泽勇 江海涛 李云辉

Optical Tamm state and related lasing effect enhanced by planar plasmonic metamaterials

Zhang Zhen-Qing Lu Hai Wang Shao-Hua Wei Ze-Yong Jiang Hai-Tao Li Yun-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于简单透镜列阵的可调焦激光均匀辐照光学系统研究

Study on a zooming optical system based on simple lens array used for laser uniform irradiation

物理学报.2015, 64(5): 054201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054201>

基于零折射磁性特异电磁介质的波前调控

Manipulation of electromagnetic wavefront based on zero index magnetic metamaterial

物理学报.2015, 64(3): 034203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034203>

飞秒激光在锥形镀膜探针传输中相位奇异的研究

Phase singularities in femtosecond laser pulses transmitting through optical fiber probes

物理学报.2015, 64(2): 024203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024203>

太赫兹电磁波低通滤波器与中药材指纹数据提取

Fingerprint data extraction from Chinese herbal medicines with terahertz spectrum based on second-order harmonic oscillator model

物理学报.2015, 64(2): 024202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024202>

小宽带光谱色散平滑光束传输特性研究

Propagation characteristics of small-bandwidth pulsed beams with smoothing by spectral dispersion in high power laser system

物理学报.2014, 63(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164201>

# 平面金属等离激元超材料对光学 Tamm 态及相关激射行为的增强作用\*

张振清<sup>1)</sup> 路海<sup>2)</sup> 王少华<sup>1)</sup> 魏泽勇<sup>1)</sup> 江海涛<sup>1)</sup> 李云辉<sup>1)†</sup>

1)(同济大学物理科学与工程学院, 教育部先进微结构材料重点实验室, 上海 200092)

2)(河南师范大学物理与电子工程学院, 新乡 453007)

(2014年9月29日收到; 2014年12月5日收到修改稿)

本文对具有类 EIR 色散特性的平面金属等离激元超材料(planar plasmonic metamaterials, PPM)对光学 Tamm 态及相关激射行为的增强作用进行了研究. 我们首先运用传输矩阵方法分析了利用 PPM 结构的色散来增强光学 Tamm 态对应模式电磁局域密度的可能性. 其次, 我们将具有类 EIR 特性的 PPM 与一维光子晶体(photonic crystal, PC)合在一起设计了一种平面等离激元超材料-光子晶体(PPM-PC)异质结构. 研究发现, 通过在电磁局域密度最高的 PPM 结构中(或附近)加入增益介质, 可观察到比普通光学 Tamm 态更强的激射增强效应及更明显的单色性响应. 这些特性使得这种 PPM-PC 结构有望被应用于低阈值激光器、荧光增强等方面.

**关键词:** 等离激元超材料, 激射增强效应, 光学 Tamm 态

**PACS:** 42.25.Bs, 52.38.Fz

**DOI:** 10.7498/aps.64.114202

## 1 引言

近年来, 超材料(metamaterials)因其在光学及微波工程等领域的广泛应用, 引起了人们愈加浓烈的研究兴趣. 超材料特指一类其等效电磁参数与天然材料迥异的亚波长人工电磁微结构. 其介电常数 $\epsilon$ 或磁导率 $\mu$ 为负时可被称为单负材料, 其中 $\epsilon < 0$ 时称为电单负材料(epsilon negative materials, ENG), 而 $\mu < 0$ 时则为磁单负材料(mu negative materials, MNG). 而这两者同时小于零时则为双负材料(double negative material, DNM). 超材料所具有的多种奇异电磁特性, 如负折射<sup>[1-5]</sup>、超透镜<sup>[6]</sup>、电磁隐身等<sup>[7,8]</sup>, 使其在2003年及2006年两次被科学杂志评选为当年的十大科技进展之一. 此外, 单负材料及其复合结构还显示出极强的对电磁场中倏逝成分的调控作用. 2003

年 Alù 和 Engheta 研究发现<sup>[9]</sup>, 电磁波虽然在电单负材料和磁单负材料内以倏逝波的形式存在, 但当这两种材料构成异质结时, 在其界面上支持一种特殊的电磁隧穿模式. 此时, 电磁场被强烈地局域在这两种单负材料之间的界面上.

为在光学频段实现这种电磁隧穿现象, 并进一步对其强电磁局域模式进行利用, 人们提出了光学 Tamm 态的概念<sup>[10-12]</sup>. 光学 Tamm 态是一种存在于电单负材料-金属薄膜复合结构界面上的一种电磁局域态. 此时, 金属薄膜在可见光频段可被视作电单负材料, 而一维光子晶体在其禁带频率处则可被用作磁单负材料. 当两者之间的虚相位及虚阻抗匹配条件满足时, 光学 Tamm 态即可产生. 近年来, 人们对光子晶体-金属复合结构中的光学 Tamm 态进行了深入的研究, 其高强度的电磁局域模式在多个领域得到了很好的应用, 如非线性效应<sup>[13,14]</sup>及法拉第磁光效应增强<sup>[15]</sup>, 高灵敏光学

\* 国家重点基础研究发展计划(973)(批准号: 2011CB922001), 国家自然科学基金(批准号: 51377003, 11234010, 61137003, 11404102), 河南省自然科学基金(批准号: 14A140002)和中央高校基本科研业务费资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liyunhui@tongji.edu.cn

传感器, 荧光效应及可能的激射效应增强等<sup>[16,17]</sup>为进一步增强该结构的电磁局域能力, 人们对平面金属结构进行了改善. 即在原来平整的金属薄膜上刻蚀出一些特殊的结构, 从而通过金属平面内的等离激元模式来对光学 Tamm 态作深入的调控. 例如, 2011 年 Gazzano 等<sup>[18]</sup>利用平面内的金属圆盘阵列提高了 Tamm 态电磁局域模式密度, 获得了荧光增强效果. 在 2013 年, 该结构对于激光激射行为的增强也初步得到了验证. 同年, 本课题组则提出<sup>[19]</sup>, 利用具有电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 特性的平面等离激元超材料可对其电磁局域程度进行更为有效的调控

电磁感应透明是在 1990 年由 Harris 等<sup>[20]</sup>最先提出的一种存在于三能级冷原子体系中的奇特量子光学现象. 因其具有显著的慢光、色散、以及电磁场强局域等特点, 受到了广泛的关注. 2008 年, 人们发现在经典系统中通过由平面等离激元超材料构造的人造原子之间的干涉效应, 也可以出现类似于量子光学系统中 EIT 效应的现象<sup>[21]</sup>. (也被称为类 EIT 效应) 不久, Soukoulis, Giesen 等分别在不同的系统中, 运用理论和实验方法验证了这种类 EIT 效应. 相比于依赖于三能级冷原子气的量子光学系统而言, 该固态结构具有结构稳定、易于集成、实现成本低廉等优点. 之后, Liu 等又提出了电磁感应反射的概念 (electromagnetically induced reflection, EIR<sup>[22]</sup>). 与 EIT 恰好相反, 其特征是在宽带的透射光谱中因人造原子之间的干涉效应出现了锐利的反射峰. 研究表明, 在这些类 EIT 及类 EIR 系统中, 由于人造原子之间的干涉会导致强烈的慢光、色散以及电磁局域特性. 这些特性都使得此类结构有较大的可能性被应用在对电磁场空间局域程度强烈依赖的非线性光学、光信号存储、荧光增强以及激射行为增强等多个应用方向.

本文中, 我们对具有类 EIR 色散特性的平面金属等离激元超材料 (planar plasmonic metamaterials, PPM) 对光学 Tamm 态及相关激射行为的增强作用进行了研究. 我们首先通过传输矩阵方法对两种单负材料构成的异质结中的电磁隧穿条件进行了分析, 并探讨了利用具有 PPM 的色散特性来增强电磁场局域的可能性. 其次, 我们通过刻蚀周期性的 PPM 结构, 并将具有 EIR 特性的 PPM 与由二氧化钛-二氧化硅构成的一维光子晶体 (photonic crystal, PC) 合在一起形成平

面等离激元超材料-光子晶体异质结构 (PPM-PC hetero-structure). 研究发现, 通过在电磁局域密度最高的 PPM 结构中 (或附近) 加入增益介质, 可观察到比通常光学 Tamm 态更强的激射增强及更明显的单色性响应. 因此, 这种平面等离激元超材料-光子晶体异质结构有望被应用于降低激光器的激射阈值

## 2 解析分析

首先, 我们对电磁波在电单负和磁单负超材料构成的异质结中隧穿现象的基本条件进行简要的分析. 如图 1 所示, 该异质结构可由具有一定厚度的两种层状电磁材料构成. 这两种层状电磁材料对应的介电系数、磁导率和厚度依次为  $\epsilon_1, \mu_1, d_1; \epsilon_2, \mu_2, d_2$ . 我们将两种材料的电磁参数按 Drude 模型形式进行选取, 从而使其分别表示电单负及磁单负超材料<sup>[23]</sup>. 同时, 设左边入射环境的介电常数、磁导率分别为  $\epsilon_{in}, \mu_{in}$ , 而右边出射环境则为  $\epsilon_{out}, \mu_{out}$ .

这里, 我们采用传输矩阵方法对该模型进行计算求解<sup>[24]</sup>.

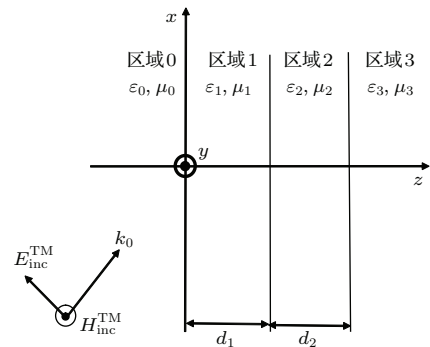


图 1 电单负和磁单负超材料构成的异质结示意图  
Fig. 1. Schematic of an ENG and MNG hetero-structure.

通过文献<sup>[9]</sup>可知, 电磁波在通过这种由电单负及磁单负超材料构成的双层异质结构时, 隧穿条件为

$$\begin{cases} \frac{\epsilon_1(\omega)d_1 + \epsilon_2d_2}{d_1 + d_2} = \epsilon_{eff} = 0, \\ \frac{\mu_1d_1 + \mu_2(\omega)d_2}{d_1 + d_2} = \mu_{eff} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

此条件满足时, 在该异质结构中即可发生电磁波的隧穿现象.

为在可见光频率范围内实现上述电磁隧穿现象, 人们必须找到对应的具有 Drude 模型色散性质

的两种单负超材料. 相对来说, 电单负材料在光频段较易实现. 自然界中, 多种金属在低于其等离子振荡频率时都具有符合Drude色散特性的负介电响应, 是一种天然存在的电单负材料. 然而, 要在光频段实现Drude形式负磁导率的磁单负材料却并不容易. 虽然人们已经在光频段设计出了开口裂隙环、渔网状结构等具有负磁导率特性的等效材料, 但其色散特性主要满足洛伦兹模型的色散形式. 而其所具有的负磁导率频段很窄, 且色散变化过于强烈, 较难实现电磁隧穿. 我们课题组在2008年提出, 可以将具有特定禁带特性的一维光子晶体等效为一种具有Drude形式色散特性的磁单负材料<sup>[23]</sup>. 此时光子晶体的禁带对电磁波不透明, 处于光子晶体禁带中的布洛赫波以倏逝波的形式存在, 这一性质同单负材料相当类似. 通过选择合适的参数便可以使光子晶体的带隙等效为我们所需的磁单负材料. 利用这种金属-光子晶体的异质结构, 可以在光频段实现电磁隧穿现象, 也就是光学Tamm态.

早期对于光学Tamm态透射特性的调控主要通过改变一维光子晶体的材料折射率、周期以及周期数, 并相应地改变金属层的匹配厚度来实现. 基于这种方法, 如果想提高光学Tamm态对应模式的品质因子或其电磁局域程度的话, 只能增加构成光子晶体的两种介质材料的折射率对比, 或增加其周期数. 一般而言, 自然界中材料折射率的取值范围较为有限, 而增加周期数势必增加器件的体积. 因此, 这些传统方法都具有一定的局限性. 仔细观察(1)式不难得知, 上述方法的本质主要是改变了(1)式中 $\mu_2(\omega)$ 的色散特性. 我们发现, 如果 $\mu_2(\omega)$ , 也

就是光子晶体的结构色散特性不作改变, 而在原本完整的金属层中通过刻蚀具有类EIR特性的空气或介质槽引入额外的结构色散, 即对 $\varepsilon_1(\omega)$ 的色散特性进行重新设计, 那么同样可以对光学Tamm态的透射特性, 包括透射率、品质因子以及电磁局域密度进行进一步的调控与增强. 并且, 由于此时电磁场强烈局域在类EIR结构的空气或介质槽内, 电磁场的局域模式体积大大减小. 我们知道, 激光器的阈值主要由Purcell因子决定, Purcell因子越大其阈值就越低. 而Purcell因子可由下式决定<sup>[25]</sup>:

$$F = \frac{3}{4\pi^2} \left( \frac{Q}{V_{\text{mode}}} \right) \left( \frac{\lambda}{2n} \right)^3, \quad (2)$$

其中 $Q$ 是共振腔的品质因子,  $V_{\text{mode}}$ 是模式体积,  $\lambda$ 是共振腔对应的波长,  $n$ 是介质折射率. 因此, 在金属-光子晶体异质结构中引入结构色散, 将使其模式体积 $V_{\text{mode}}$ 减小同时品质因子 $Q$ 增大, 从而通过Purcell因子的增加来降低激光器的阈值<sup>[26,27]</sup>.

### 3 仿真计算

为验证这种激射增强效应, 我们设计了如图2所示的金属平面等离激元超材料-光子晶体 (PPM-PC) 异质结构. 其中一维光子晶体结构为 $(\text{CD})_6$ , 由二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )和二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )两种材料交替生长构成. 二氧化硅(C层)和二氧化钛层(D层)的折射率和厚度分别为:  $n_C = 2.16$ ,  $n_D = 1.46$ ,  $d_C = 90 \text{ nm}$ , 以及 $d_D = 210 \text{ nm}$ . 此处用来与光子晶体匹配的金属薄层我们选用银, 厚度为 $30 \text{ nm}$ , 其色散模型选取文献<sup>[28]</sup>中的形式.

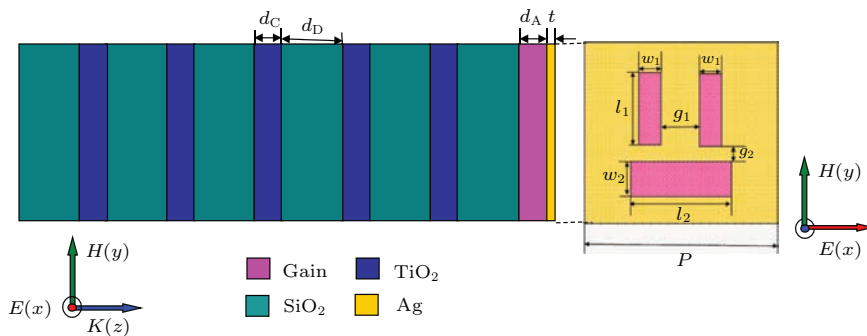


图2 (网刊彩色) 平面等离激元超材料-光子晶体异质结构示意图 (右侧为平面内金属PPM结构的单元示意图. 其中 $l_1 = 100 \text{ nm}$ ,  $w_1 = 30 \text{ nm}$ ,  $g_1 = 60 \text{ nm}$ ,  $l_2 = 128 \text{ nm}$ ,  $w_2 = 50 \text{ nm}$ , 以及 $g_2 = 20 \text{ nm}$ . 该结构在 $xy$ 平面内周期性拓展, 周期为 $s = 400 \text{ nm}$ . 银的厚度为 $t = 30 \text{ nm}$ )

Fig. 2. (color online) (Left) Schematic of the PPM-PC hetero-structure consisting of planar plasmonic metamaterials and photonic crystal. (Right) Front view of the planar plasmonic metamaterials. The geometry parameters are  $l_1 = 100 \text{ nm}$ ,  $w_1 = 30 \text{ nm}$ ,  $g_1 = 60 \text{ nm}$ ,  $l_2 = 128 \text{ nm}$ ,  $w_2 = 50 \text{ nm}$ ,  $g_2 = 20 \text{ nm}$ ,  $d_C = 90 \text{ nm}$  and  $d_D = 210 \text{ nm}$ . The periods in both  $x$  and  $y$  directions are  $P = 400 \text{ nm}$ . The thickness of silver film on PC substrate is  $t = 30 \text{ nm}$ .



通过在该金属薄层上刻蚀一个竖直的槽和两个水平的槽, 就可以实现具有类似EIR谱线的金属平面等离子激元超材料. 具体结构及参数如图2右侧所示, 其中  $l_1 = 100 \text{ nm}$ ,  $w_1 = 30 \text{ nm}$ ,  $g_1 = 60 \text{ nm}$ ,  $l_2 = 128 \text{ nm}$ ,  $w_2 = 50 \text{ nm}$ ,  $g_2 = 35 \text{ nm}$ . 需要说明的是, 由  $\text{SiO}_2$  和  $\text{TiO}_2$  薄膜交替生长组成的一维光子晶体以及覆于其上的金属薄层, 利用光频段成熟的气相外延生长技术, 如MOCVD, 可方便地进行制备. 然后, 使用电子束光刻技术即可在金属薄层上刻蚀出具有EIR特性的平面金属等离子激元结构[29].

本文中, 我们利用FDTD方法对该结构进行仿真模拟计算, 电场入射方向以及极化方式如图2所示. 首先, 通过电磁场全场仿真我们在图3(插图)中给出了上述金属-光子晶体(Metal-PC, 或M-PC)和PPM-PC结构在未加增益材料情况下的反射谱线. 可以发现, 两者光学Tamm态的频率均在292 THz附近. 并且, 在引入具有类EIR特性的PPM结构之后, 其品质因子有显著的增加, 将近提高了4倍.

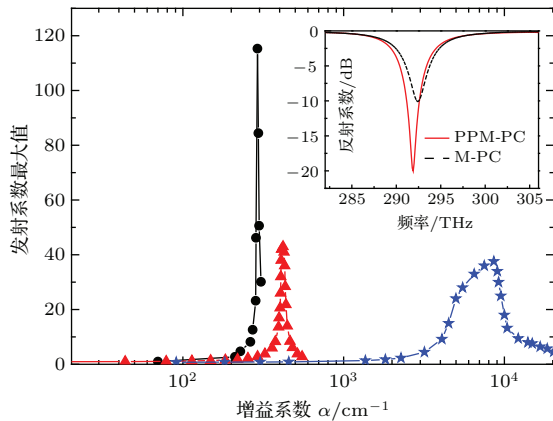


图3 (网刊彩色) 三种情况下发射系数最大值随增益系数的变化关系(插图为M-PC和PPM-PC结构在未加增益材料情况下的反射谱线. 蓝色五星: 情况1, 红色三角: 情况2, 黑色圆点: 情况3)

Fig. 3. (color online) Diagrams of the maximum of emission coefficient along with the gain coefficient  $\alpha$  in three different cases. Blue, red and black lines represent for case 1, case 2 and case 3, respectively. Inset: Reflection coefficient for M-(CD)<sub>6</sub> structure (black dot line) and PPM-(CD)<sub>6</sub> structure (red solid line).

其次, 我们在金属-光子晶体异质界面处引入了增益介质, 并在三种情况下比较了增益介质对激射增强效果的影响. 这三种情况分别是: 1) 采用完整的金属平面, 即M(CD)<sub>6</sub>结构, 但将最靠近金属层的D层, 也就是二氧化钛层替换为增益材

料. 2) 在金属平面上刻蚀具有类EIR特性的PPM结构, 同时将最靠近金属层的D层替换为增益材料. 3) 保持原有光子晶体(CD)<sub>6</sub>结构不变, 在金属平面上刻蚀出的PPM结构的槽内填充相同的增益材料. 通过Zheludev等的工作可知, 增益介质的增益系数  $\alpha = (2\pi/\lambda)\text{Im}(\sqrt{\epsilon' + i\epsilon''})$ , 是一个与波长或频率相关的函数. 其中  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  是介电系数的实部与虚部[30]. 这里, 我们将增益介质的实部  $\epsilon'$  设定为11.38, 接近于常用的增益介质InGaAsP[31]. 在图3中, 我们给出了这三种情况下仿真计算得到的发射系数的最大值随增益系数变化的关系谱线. 分析第一种情况可知(红色三角), 由于M(CD)<sub>6</sub>结构的电磁局域能力有限, 对激射效应的增强不显著, 其增益系数需要接近10<sup>4</sup>才能获得约40倍的发射系数的增强. 对于第二种情况(蓝色五星), 增益介质只需具备约500的增益系数就可以达到与M(CD)<sub>6</sub>结构相同的发射系数增强效果, 与情况1相比减小了超过20倍. 而在第三种情况下(黑色圆点), 对增益系数的要求进一步降低, 同时发射系数增强效果反而更为显著. 只需300左右的增益系数即可使其发射系数达到近120倍的增强. 通过比较后两种情况我们可以知道, 由于在电磁隧穿频率电磁场强烈局域在PPM结构的槽内, 在这些位置内加入增益材料可以更有效地促进光场和增益介质之间的相互作用, 从而实现发射系数的增强. 并且, 前两种方法增益介质位于结构的内部, 而第三种方法是在结构的表面进行生长、掺杂等操作, 制备的难度大大降低.

最后, 我们对第三种情况下, 亦即在PPM结构的槽内填充增益材料, 同时将D层, 也就是二氧化钛层替换为增益材料时给出了较为详细的仿真计算结果, 如图4. 我们给出了不同的增益系数下该结构的发射系数随频率以及增益系数变化关系的谱线. 将每条谱线中发射系数的最大值取出, 并联系此时的增益系数, 我们就可得到如图4右上角插图中所示的发射系数最大值-增益系数关系谱线. 需要说明的是, 图3中, 另外两种情况的发射系数最大值-增益系数关系谱线我们也是通过相同的方法给出, 限于篇幅没有给出详细的发射系数随频率变化关系的谱线. 另外, 通过图4左上角插图可知, 起初发射系数最大值随增益系数的增加而迅速上升, 然而当增益系数超过某一最大值时, 发射系数反而下降, 此现象即为增益饱和[29,31].

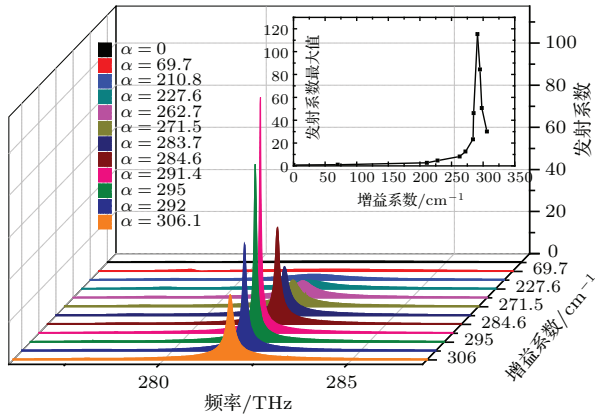


图4 (网刊彩色) 发射系数随增益系数以及频率变化的关系图 (插图为发射系数最大值随增益系数的变化关系)

Fig. 4. (color online). Emission spectra for different gain coefficient  $\alpha$ . Inset: Diagrams of the maximum of emission coefficient along with the gain coefficient  $\alpha$ .

## 4 结 论

本文中, 我们提出了一种利用具有类EIR色散特性的PPM来对光学Tamm态及相关激射行为进行增强的方法. 分析表明, 这种增强效应主要来自于金属平面内PPM结构的色散特性对于电磁隧穿行为的强烈调制. 通过在电磁局域密度最高的PPM结构中加入增益介质, 观察到了比普通光学Tamm态结构更强的激射增强效果. 这些特性使得这种PC-PPM结构有望被应用于低阈值激光器、荧光效应增强等方面.

## 参考文献

[1] Shalaev V M, Cai W, Chettiar U K, Yuan H K, Sarychev A K, Drachev V P, Kildishev A V 2005 *Opt. Lett.* **30** 3356  
 [2] Shalaev V M 2007 *Nat. Photonics* **1** 41  
 [3] Soukoulis C M, Linden S, Wegener M 2007 *Science* **315** 47  
 [4] 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  
 [5] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788  
 [6] Zhang X, Liu Z 2008 *Nat. Materials* **7** 435  
 [7] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780  
 [8] Liu L X, Dong L J, Liu Y H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134210 (in Chinese) [刘丽想, 董丽娟, 刘艳红 2012 物理学报 **61** 134210]

[9] Alù A, Engheta N 2003 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **51** 2558  
 [10] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S, Abram R A, Chamberlain J M, Kavokin A V, Shelykh I A 2007 *Phys. Rev. B* **76** 165415  
 [11] Sasin M E, Seisyan R P, Kalitchevski M A, Brand S, Abram R A, Chamberlain J, Yu M, Egorov A, Vasil'ev A P, Mikhlin V S, Kavokin A V 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 251112  
 [12] Jiang Y, Zhang W L, Zhu Y Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 167303 (in Chinese) [蒋瑶, 张伟利, 朱叶雨 2013 物理学报 **62** 167303]  
 [13] Lu H, Xue C H, Wu Y G, Chen S Q, Zhang X L, Jiang H T, Tian J G, Chen H 2012 *Opt. Commun.* **285** 5416  
 [14] Xue C H, Jiang H T, Chen H 2011 *Opt. Lett.* **36** 855  
 [15] Dong L J, Jiang H T, Chen H, Shi Y L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 093101  
 [16] Symonds C, Lheureux G, Hugonin J P, Greffet J J, Laverdant J, Brucoli G, Lemaitre A, Senellart P, Bellessa J 2013 *Nano Lett.* **13** 3179  
 [17] Oulton1 R F, Sorger1 V J, Zentgraf1 T, Ma R M, Gladden1 C, Dai L, Bartal1G, Zhang X 2009 *Nature* **461** 629  
 [18] Gazzano O, Vasconcellos S M de, Gauthron K, Symonds C, Bloch J, Voisin P, Bellessa J, Lemaitre A, Senellart P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 247402  
 [19] Lu H, Li Y H, Feng T H, Wang S H, Xue C H, Kang X B, Du G Q, Jiang H T, Chen H 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 111909  
 [20] Arris S E, Field J E, Imamoglu A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1107  
 [21] Zhang S, Genov D A, Wang Y, Liu M, Zhang X 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 047401  
 [22] Liu N, Weiss T, Mesch M, Langguth L, Eigenthaler U, Hirscher M, Sonnichsen C, Giessen H 2010 *Nano Lett.* **10** 1103  
 [23] Guo J Y, Chen H, Li H Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2544  
 [24] Smith D R, Schultz S, Markoš P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104  
 [25] Purcell E M 1946 *Phys. Rev.* **69** 681  
 [26] Ding P, Cai G W, Wang J Q, He J N, Fan C Z, Liu X M, Liang E J 2014 *J. Opt.* **16** 065003  
 [27] Ordal M A, Long L L, Bell R J, Bell S E, Bell R R, Alexander R W, Ward C A 1983 *Appl. Opt.* **22** 1099  
 [28] Du G Q, Jiang H T, Wang Z S, Yang Y P, Wang Z L, Lin H Q, Chen H 2010 *J. Opt. Soc. Am. B.* **27** 1757  
 [29] Zheludev N I, Prosvirnin S L, Papasimakis N, Fedotov V A 2008 *Nat. Photonics* **2** 351  
 [30] Nezhad M P, Tetz K, Fainman Y 2004 *Opt. Express* **12** 4072  
 [31] Dong Z G, Liu H, Li T 2009 *Phys. Rev. B* **80** 235116

# Optical Tamm state and related lasing effect enhanced by planar plasmonic metamaterials\*

Zhang Zhen-Qing<sup>1)</sup> Lu Hai<sup>2)</sup> Wang Shao-Hua<sup>1)</sup> Wei Ze-Yong<sup>1)</sup>  
Jiang Hai-Tao<sup>1)</sup> Li Yun-Hui<sup>1)</sup>†

1) (Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials MOE, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

2) (College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

( Received 29 September 2014; revised manuscript received 5 December 2014 )

## Abstract

Optical Tamm state (OTS) refers to a kind of interface state between the metal layer and the photonic crystal (PC) reflectors. Given the matching conditions being satisfied, the electromagnetic waves tend to tunnel through the metal-PC hetero-structure efficiently. Quite different from the conventional surface plasmon polaritons (SPPs) on metal surface, OTSs can be excited directly by normally incident propagating waves for both TE and TM polarizations to occur. In the meantime, strong electromagnetic (EM) localization around the interface can be achieved, leading to potential applications such as polariton lasers, enhancement of Faraday rotation, various nonlinear effects, and so on.

To further enhance the EM localization around the interface, some well designed artificial structures are patterned on the thin metal layer. For instance, confined Tamm plasmon modes with the aid of metallic microdisks are proposed by Gazzano et al. to control the spontaneous optical emission. Moreover, in 2013 it was also demonstrated that planar plasmonic metamaterials (PPM) with electromagnetically-induced-reflection-like (EIR-like) dispersion can boost the  $Q$ -factor of OTS tunneling mode, as well as the EM localization around the interface between planar plasmonic metamaterials and PC. Both these methods can be understood in the same scheme: the structure-induced dispersion provides exotic power of modulating the propagation of OTS.

In this paper, the enhancement of optical Tamm state and related lasing effect is investigated by introducing planar plasmonic metamaterials with EIR-like dispersion. The planar plasmonic metamaterials are achieved by periodic patterning some plasmonic units on the planar metal layer. Through fine tuning each unit cell, EIR-like dispersion can be achieved, making the properties of hetero-structure more tunable. One-dimensional photonic crystals composed of  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  are also designed properly to support the optical Tamm state in PPM-PC hetero-structure. First, to analyze the possibility of enhancing local electromagnetic field density of optical Tamm state, a transfer matrix method is performed when EIR-like dispersion of PPM structure is hired. Next, full wave simulations based on FDTD method are also carried out to verify a hetero-structure composed of PPM and one-dimensional photonic crystal embeded with gain media. By introducing gain medium into (or near) the PPM structure, where the maximum local electromagnetic field density exists, the lasing effect is found obviously enhanced. Better emitting efficiency and monochromic response can be observed compared to the common metal-PC hetero-structure. These features make our structure promising to reduce the lasing threshold, enhance the fluorescence, and so on.

**Keywords:** planar plasmonic metamaterials, enhancement of lasing effect, optical tamm states

**PACS:** 42.25.Bs, 52.38.Fz

**DOI:** 10.7498/aps.64.114202

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB922001), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51377003, 11234010, 61137003, 11404102), the Natural Science Foundation of Henan Province, China (Grant No. 14A140002), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

† Corresponding author. E-mail: [liyunhui@tongji.edu.cn](mailto:liyunhui@tongji.edu.cn)