

光子晶体增强中红外发光研究

章 俊 张培晴* 牛雪珂 戴世勋 张 巍 王训四 聂秋华

宁波大学高等技术研究院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211

摘要 稀土掺杂硫系玻璃是实现中红外发光的重要手段,通过在稀土掺杂硫系玻璃样品上构造光子晶体结构可以大大增强其发光效率。制备了 Tm^{3+} 离子掺杂硫系玻璃样品并测试了其光谱特性,通过设计光子晶体结构来增强 Tm^{3+} 离子跃迁产生的 $3.73\ \mu m$ 处的荧光强度。利用有限时域差分法(FDTD)进行运算,模拟结果表明,通过优化设计的光子晶体结构参数,掺杂样品在 $3.73\ \mu m$ 处的光子态密度相比于未采用光子晶体结构所产生的光子态密度有极大提高,计算其Purcell放大因子可达到未进行结构设计的50倍以上。光子态密度的极大提高以及Purcell放大因子为增强发光强度提供了理论依据,该研究结果对实现高效率中红外光源器件具有重要的指导意义。

关键词 材料;光子晶体;中红外发光;发光增强;有限时域差分法

中图分类号 TN203; TN214

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0416001

Enhancing the Mid-infrared Fluorescence Emission by Designing Photonic Crystals

Zhang Jun Zhang Peiqing Niu Xueke Dai Shixun Zhang Wei

Wang Xunsi Nie Qiuhua

*Laboratory of Infrared Materials and Devices, The Research Institute of Advanced Technologies,
Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China*

Abstract Rare earth doped chalcogenide glasses is an important way to achieve mid-infrared luminescence. By designing photonic crystal structure on the sample, the luminous efficiency of the glass can be enhanced greatly. Tm^{3+} doped chalcogenide glass is prepared and the related optical properties are tested. Photonic crystal structure on the glass sample is designed to enhance the emission of $3.73\ \mu m$ fluorescence which generated by the transition of Tm^{3+} ions. Finite difference time domain (FDTD) simulation shows that the photon density of states at $3.73\ \mu m$ is greatly enhanced in the sample with designed photonic crystal, the Purcell amplification factor can be over 50 times than that in the bulk sample. This greatly increment of the photon density of states and the Purcell factor provides a theoretical basis for the enhancement of luminescence. The results of this work can be used to achieve high efficiency infrared light source device.

Key words materials; photonic crystals; mid-infrared luminescence; emission enhancement; finite difference time domain method

OCIS codes 160.5690; 050.5298; 220.4000

1 引 言

$3\sim 5\ \mu m$ 中红外光源在军事和民用方面都有广泛的应用^[1],如军用方面的红外热像仪、红外测距、激光通讯,以及民用的地球遥感探测、生物医疗、有毒气体检测等。同时该波段也是极重要的大气第二窗口(这一波段范围包括了许多重要的分子特征谱线)^[2-4]。因此,增强中红外发光并发展高效中红外光源成为近年来

收稿日期: 2014-10-16; 收到修改稿日期: 2014-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61307060, 61107047)、国家科技部重大国际合作项目(2001DFA12040)、宁波大学王宽城幸福基金

作者简介: 章 俊(1988—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: zhangjun5012@sina.com

导师简介: 聂秋华(1954—),男,教授,主要从事光通信与光纤材料等方面的研究。Email: nieqiuhua@nbu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: zhangpeiqing@nbu.edu.com

制备光器件的一大热点。

红外透光性能是红外光学材料最重要的基本性能之一。作为红外玻璃材料,首先要求具有优异的红外光学性能,尤其是在3~5 μm具有高透射率^[5]。硫系玻璃具有声子能量小并且对抽运光和中红外波段具有良好的透射性等优点,因而成为稀土离子掺杂的重要玻璃材料,相比石英玻璃和氟化物玻璃具有不可取代的优越性^[6-8]。稀土掺杂的硫系玻璃是产生中红外光源的重要基质材料,在众多的稀土离子中,Tm³⁺离子能够跃迁产生近红外及中红外荧光,同时Tm³⁺离子的基态³H₆能级到激发态³H₄能级的跃迁正好处于800 nm附近,非常适合采用常见的商用固体激光器(GaAlAs)进行高效抽运^[9]。即使如此,目前Tm³⁺掺杂硫系玻璃产生的中红外发光仍不强^[10],寻求有效手段来增强稀土掺杂硫系玻璃的中红外发光显得格外重要。

光子晶体是一种折射率周期性变化的人造光学材料,光子局域和光子带隙是它的两个最基本的特征^[11-12]。光子晶体中自发辐射的几率与光子所在频率的态密度成正比^[13]。在带隙中态密度为零,故频率落在带隙中的光是禁止传播的。光子晶体最早被提出用来抑制自发辐射,随后的研究发现在发光基质中引入光子晶体结构不仅可以控制光场的传播方向,还可以用来增强材料的自发辐射强度^[14]。非晶材料—玻璃在可见光和红外区具有很好的透光性、各向同性,能够形成各种复杂的形状而使其有着巨大的潜在应用前景^[15]。近年来,研究人员利用光子晶体结构来增强自发辐射的探索促进了低阈值激光器的产生^[16],然而利用光子晶体结构来增强稀土掺杂硫系玻璃的中红外发光仍鲜有报道。

本文采用熔融淬冷法制备了72GeS₂-18Ga₂S₃-10CsI(摩尔百分比,%)掺杂质量分数为1%的Tm³⁺硫系玻璃样品,光谱特性测试发现其Tm³⁺的荧光发射峰大约在3.73 μm附近(该波段是极重要的大气窗口,有广泛的应用价值)。通过在玻璃样品上引入含点缺陷阵列的光子晶体结构,研究了其对3.73 μm处荧光发射强度的调制效果。采用有限时域差分法(FDTD)分析了含点缺陷光子晶体结构的玻璃样品的光子态密度及Purcell放大因子^[17-18],并通过监控样品的Q因子和Purcell放大因子,建立了一套完整的光子晶体结构优化流程:利用光子带隙地图,获得初步的占空比范围;对于设定的占空比,计算其归一化的缺陷频率,令此频率等于材料的发光中心频率并确定此时光子晶体的晶格常数;根据得到的晶格常数和占空比等参数,计算样品的Q因子和Purcell放大因子,并由此作出Purcell放大因子与占空比的关系曲线。选取Purcell放大因子的最大值,便可得到最优化的光子晶体结构参数。研究发现,含光子晶体结构的样品相比于未进行结构设计的玻璃样品的光子态密度得到了很大的提高,本文设计的含光子晶体结构样品的Purcell放大因子可达50.8。光子态密度的显著提高以及较高的Purcell放大因子为增强中红外发光提供了强有力的理论依据^[11,19]。

2 理论分析

光子带隙是光子晶体的最主要特征,光子晶体的带隙可由透射谱或反射谱确定,低透射率或高反射率的区域一般被认为是光子带隙。光的自发辐射概率与光子态密度成正比,由于在带隙中光子态密度几乎为零,所以频率和能量处于带隙内的光子被禁止传播^[13,20,21]。基于这一点,传统的光子晶体常被用来制作光滤波器。随后的研究发现光子晶体不仅可以抑制自发辐射,还可用于增强光的自发辐射^[22]。在光子晶体中合理引入某种缺陷时,光子带隙中会出现频率极窄的缺陷态,与缺陷态频率吻合的光子就能限制在缺陷位置传播,光子一旦偏离缺陷处,就进入频率禁带,光就会迅速衰减。缺陷态处的光子具有极低的群速度,可用于增强光与物质的相互作用,此外由于光子禁带的所有自发辐射模几乎全部集中在缺陷态,其他模被抑制,从而自发辐射模的数量被大大压缩,缺陷频率处的光子具有极高的态密度,从而处在缺陷态频率处的光可以得到放大。

为增强稀土掺杂硫系玻璃的中红外发光,采取以下两种途径:1)由于自发辐射几率与光子态密度成正比,因此可以通过设计发光物体结构,使其发光频率处具有很高的光子态密度;2)此结构还必须拥有相对较高的品质因素(Q值)和较小的模体积,以降低光的能量衰减,从而有较大的Purcell放大因子。

光子态密度(DOS)是衡量自发辐射的重要依据,可通过以下表达式获得^[23]:

$$N(\omega) = \sum_n \int_{\text{FBZ}} d^3k \delta(\omega - \omega_{nk}), \quad (1)$$

式中FBZ表示第一布里渊区, ω_{nk} 为电场模式的本征频率, $k=2\pi/\lambda$ 为光波波矢, n 为能带指标。

相比于块体材料,光子晶体的引入将极大地改变样品中光子态密度的分布,对材料的发光效果产生重要的影响。恰当的结构可以极大地增强材料的发光强度,此效果可通过描述自发辐射放大效果的 Purcell 放大因子来表述^[24],其表达式为

$$F_p = \frac{3}{4\pi^2} \times \frac{Q}{V_m} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^3, \quad (2)$$

式中 Q 为品质因子, λ 为波长, n 为折射率, V_m 为模体积。品质因子 Q 是衡量光子晶体微腔中缺陷模好坏的重要因素, Q 值越高说明腔内光损耗越低,腔内的能量向外泄漏的越少。 Q 值可利用能量衰减法获得^[25]:

$$Q = 2\pi f/\alpha, \quad (3)$$

式中 f 为谐振频率, α 为能量衰减系数,可通过指数函数拟合得到。能量衰减法认为微腔内存储的能量是以 $U(t) = U_0 \exp(-\alpha t)$ 的指数形式衰减的。本文即利用能量衰减法来获取光子晶体模板的 Q 值。

3 实验样品制备、参数测试以及结构设计和数值模拟

3.1 玻璃样品的制备与参数测试

通过熔融淬冷法制备了以 $72\text{GeS}_2-18\text{Ga}_2\text{S}_3-10\text{CsI}$ (摩尔分数,%) 为基质并且掺杂了质量分数为 1% 稀土离子 Tm^{3+} 的玻璃样品^[26],制备该玻璃样品时原料选用了高纯度 Ge、Ga、S (99.999%)、CsI (99.9%) 和 Tm_2S_3 (99.9%)。Ge-Ga-S 体系玻璃在可见光波段具有良好的透射率,适用于可见光及近红光激光抽运激发稀土离子跃迁到高能级,这非常适合 Tm^{3+} 离子跃迁所需的波段 (800 nm 附近);此外 Ge-Ga-S 组分玻璃有较低的声子能量,虽然 Tm^{3+} 离子跃迁产生中红外的荧光分支比不大,但也使中红外荧光辐射成为可能。另外适当 CsI (卤化物) 的引入有利于增加稀土离子 Tm^{3+} 的溶解度以及量子效率。

在室温下测量了制备样品的中红外发射光谱和吸收光谱,如图 1 所示。实验中采用相干公司生产的中心波长为 800 nm 的钛宝石激光源 (Coherent Mira900-D) 进行抽运,吸收光谱的测试采用 Perkin-Elmer 公司的 LAMBDA950 紫外-可见-近红外分光光度计,发射光谱的测量则采用 Zolix Omni- λ 3015 单色仪配合液氮制冷的 InSb 探测器 (DInSb55-De),并使用锁相放大器提高光谱的信噪比。从发射光谱中可以看出其中红外荧光峰值在 $3.73 \mu\text{m}$ 处,对应于 ${}^3\text{H}_5 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ 能级跃迁,实验测得其发射截面为 $7.66 \times 10^{-21} \text{cm}^2$,该波段跃迁产生中红外荧光波长范围从 $3.55 \sim 4.10 \mu\text{m}$,半峰全宽约为 250 nm,表明此材料是有望实现高效宽带中红外光源的极佳材料之一。

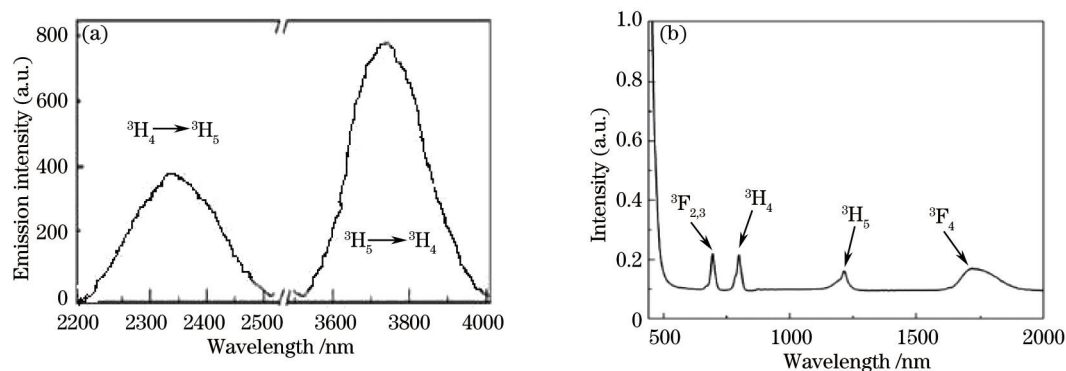


图 1 (a)玻璃样品的中红外发射光谱图; (b)玻璃样品的吸收光谱图

Fig.1 (a) Infrared emission spectra of the sample glass; (b) absorption spectra of the sample glass

3.2 光子晶体结构与数值模拟

光子晶体带隙的产生取决于光子晶体晶格类型、材料的折射率、晶格周期及占空比等因素^[27]。光子晶体可以以一维 (1D)、二维 (2D) 和三维 (3D) 的方式对光的发射和传播进行调制。在本工作中,采用二维空气孔薄层光子晶体结构,研究其对中红外发光的增强效果。实验测得硫系玻璃样品在 $3.73 \mu\text{m}$ 处的折射率为 2.135,采用孔洞型三角晶格光子晶体结构更易于产生完全光子带隙。为了获得最恰当的空气孔占空比,必须确立带隙宽度与占空比的大小关系。首先计算了无缺陷三角晶格光子晶体的带隙随空气孔占空比 (r/a , a

为晶格周期)的变化关系,得到了光子晶体禁带宽度随占空比的变化关系。计算发现,对于设计的光子晶体模板,其TM模在平面内可以形成完全光子带隙,而TE模无法形成完全带隙,因此在本文中,仅利用TM模开展结构设计。图2(a)给出了TM对应的带隙曲线,图中曲线分别代表光子晶体的第一带隙的上下边缘。两条能带相减即可得到带隙宽度与占空比之间的大小关系。为分析方便,计算中采用归一化频率 $\omega a/2\pi c=a/\lambda$ 。从图2(a)中可以看出占空比在0.22~0.48之间容易产生TM模完全光子带隙。图2(b)为 $r/a=0.35$ 时的光子晶体能带图。在本工作中通过优化出最合理光子晶体的结构周期和空气孔占空比,使样品在荧光发射波长具有高的态密度和大的Purcell放大系数,从而实现荧光自发辐射的增强。

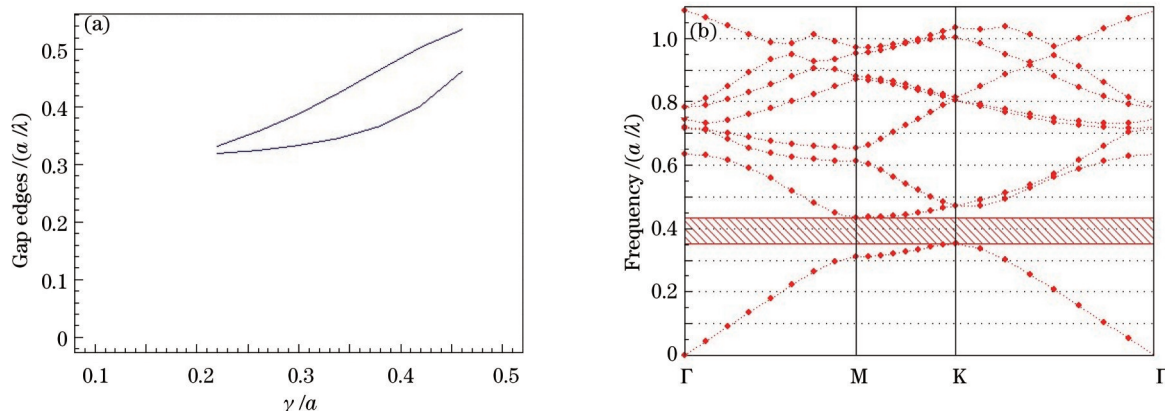


图2 (a)二维三角晶格光子晶体TM模带隙边缘图;(b) $r/a=0.35$ 时二维三角晶格光子晶体TM模带隙

Fig.2 (a) TM mode boundaries of 2D hexagonal lattice photonic crystals; (b) TM mode band gap of 2D hexagonal lattice photonic when $r/a=0.35$

为使 Tm^{3+} 离子跃迁产生的 $3.73\ \mu m$ 附近范围处的发光得到增强,在设计的光子晶体结构中引入缺陷阵列,使其在带隙范围内产生一个态密度极高的缺陷模式,用以增强该频率的自发辐射强度。设计缺陷阵列结构如图3(a)所示,图3(b)为 $r/a=0.35$ 时光子晶体模板的TM模带隙结构图,从图中可以看出该结构的光子晶体在归一化频率 $a/\lambda=0.3952$ 处存在明显的缺陷模,若选定缺陷波长为 $\lambda=3.73\ \mu m$,则根据归一化频率的定义,当光子晶体结构的晶格周期 $a=0.3952\lambda=1.4741\ \mu m$ 时,此光子晶体模板对 Tm^{3+} 在 $3.73\ \mu m$ 处荧光将有一定的增强效果。

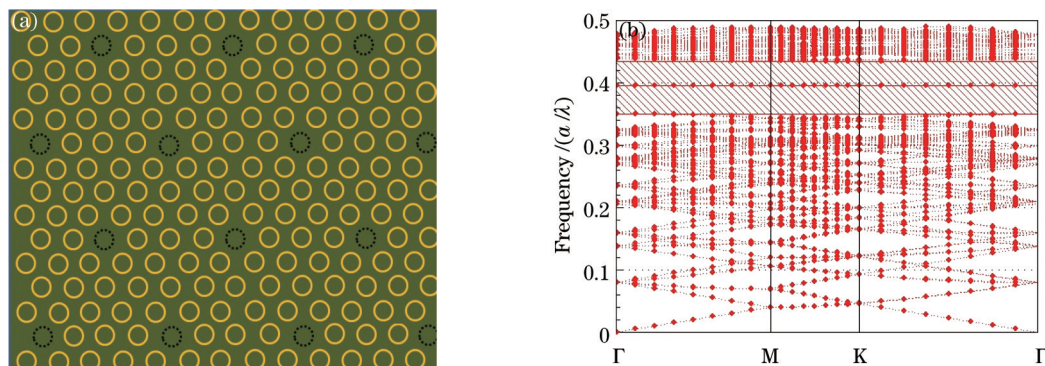


图3 (a)含点缺陷二维三角晶格光子晶体平面结构;(b)引入缺陷后的TM模带隙结构

Fig.3 (a) 2D hexagonal lattices with cavity arrays; (b) TM band structure of the designed photonic crystals

为了进一步优化光子晶体结构参数,使其对 $3.73\ \mu m$ 附近的中红外发光具有最大增强效果,通过计算不同占空比 r/a 情况下的 Q 值、腔体积、Purcell放大因子来确定最优的结构参数,并且分别计算该光子晶体结构和块状硫系玻璃样品的光子态密度来验证此结构对 $3.73\ \mu m$ 具有放大效果。由于 Q 值能体现光能量衰减程度的大小, Q 值越高光在微腔内损耗的能量越小,从而影响Purcell放大因子。而自发辐射的几率则与光子态密度成正比,因此光子态密度可以用来间接反映荧光的强弱。发光增强效果好的光子器件要求在发光波长处拥有相对较高的Purcell因子和高的光子态密度。

品质因子、模体积、Purcell因子都是表征发光器件性能的重要参数,微腔的品质因子越高,模体积越小,其Purcell因子就越大,样品对发光的放大效果也越好。为了确定最优结构,本文通过计算获得了一系列谐振波长为 $3.73\ \mu\text{m}$ 的不同占空比下光子晶体结构周期和对应结构下的 Q 值、腔体积以及Purcell放大因子。首先计算了品质因子 Q 随占空比的变化关系,为了保证设计的光子晶体模板的缺陷波长始终为 $3.73\ \mu\text{m}$,在任意占空比情况下,首先计算带隙及归一化的缺陷频率,并根据归一化频率的定义确定此光子晶体模板的晶格常数 a ,然后利用能量衰减法获得光子晶体微腔阵列的品质因子 Q 。图4(a)给出了品质因子和光子晶体周期 a 随占空比的变化关系,从图中可以看出在占空比为0.39处 Q 有最大值232,对应光子晶体周期 $a=1.557\ \mu\text{m}$ 。图4(b)给出了模体积和周期 a 随占空比的变化关系,从图中可以看出仍在占空比0.39处模体积有最小值,其值为 $1.85\ \mu\text{m}^3$,相应的可获得Purcell放大因子和周期 a 随占空比的变化关系,如图4(c)所示。图中当占空比为0.39时,Purcell放大因子具有最大值 $F_p=50.8$ 。由此可以确定设计的光子晶体微腔阵列的最优占空比为0.39(此处的归一化频率 $a/\lambda=0.4174$),周期 $a=3.73\times 0.4174=1.557\ \mu\text{m}$ 。

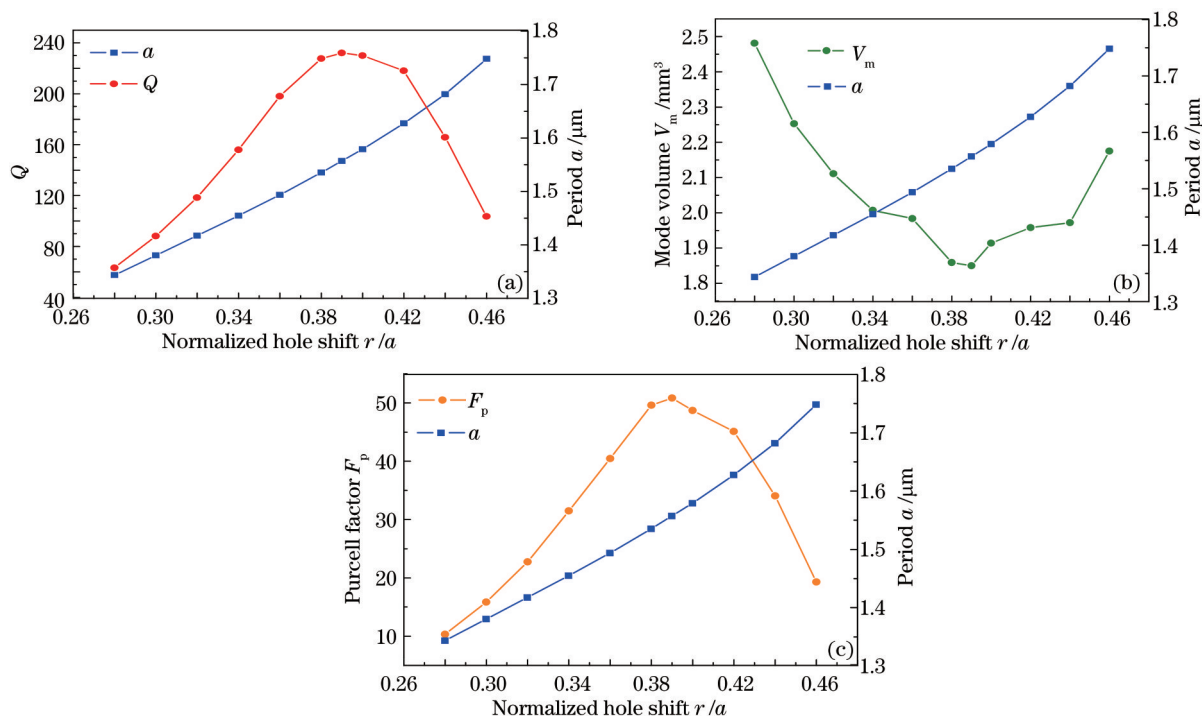


图4 (a)品质因子和周期 a 随占空比的变化关系;(b)模体积和周期 a 随占空比的变化关系;(c) Purcell因子和周期 a 随占空比的变化关系

Fig.4 (a) Results of quality factor and period with the hole shift r/a ; (b) results of mode volume and period with the hole shift r/a ; (c) result of Purcell factor and period with the hole shift r/a

通过进一步对比含光子晶体结构的样品和块体材料中的光子态密度来验证设计的光子晶体模板对红外发光的增强效果。图5为计算获得的光子态密度曲线图,其中横轴表示归一化频率,纵轴表示光子态密度。图中蓝色曲线表示未进行光子晶体结构设计的块状玻璃模拟所得的光子态密度曲线,红色曲线为含光子晶体微腔的玻璃样品中的光子态密度分布曲线。从图中可以看出在归一化频率 $a/\lambda=0.4174$ 处(对应波长 $\lambda=3.73\ \mu\text{m}$),含光子晶格的样品比块体材料的态密度要高出约两个数量级,而处于光子禁带频率内的光子态密度为零,表明位于光子禁带内的所有自发辐射模几乎全部集中到了缺陷态,其他模被抑制,从而自发辐射模的数量被大大压缩,自发辐射的能量大部分参与缺陷模发光,因此 $3.73\ \mu\text{m}$ 附近的中红外发光有望得到极大的增强。此外,对于 $800\ \text{nm}$ 的抽运激光,其归一化频率 $a/\lambda=1.946$,计算结果发现其处在光子晶体的高阶带隙的边缘,也具有很高的光子态密度,非常有利于抽运光的激发。图6(a)给出了模拟获得的光子晶体微腔内能量衰减曲线,其中右上角插图为红色框内区域的放大图,通过此能量衰减曲线可获得微腔的能量衰减系数,(b)为其对应的谐振频率曲线,其谐振频率 $f=0.268\ \mu\text{m}^{-1}$ (与谐振波长 $3.73\ \mu\text{m}$ 相符合)。图7给出了光

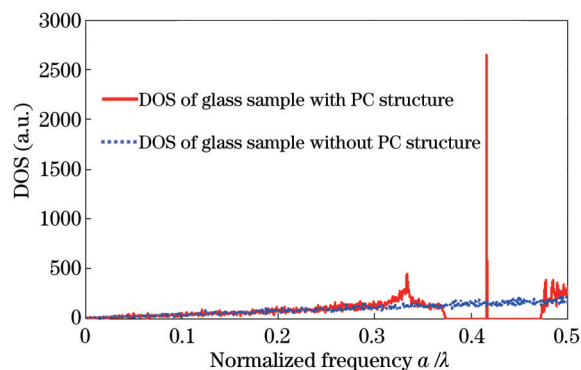


图 5 光子态密度与归一化频率关系

Fig.5 Relation between photon density of states and normalized frequency

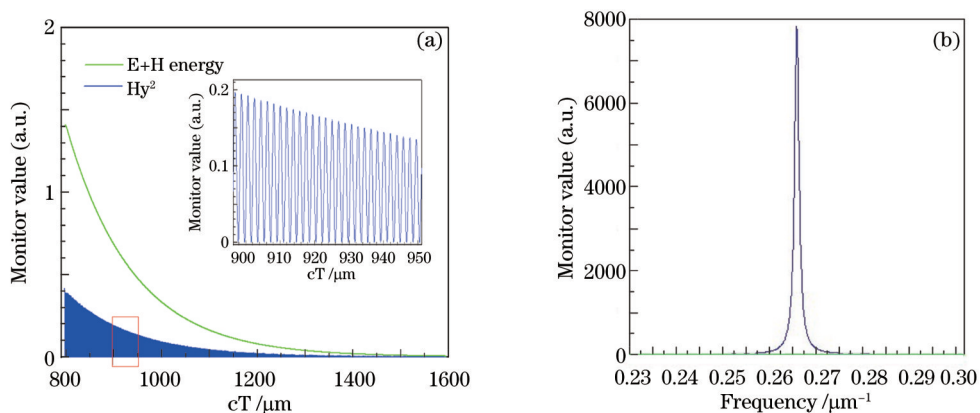


图 6 (a)微腔内能量衰减曲线,插图为红色区域的放大图; (b)缺陷结构谐振频率

Fig.6 (a) Simulated energy decay in the photonic crystal cavity, the illustration on the right corner is an enlarged view of the red zone; (b) resonant frequency of designed photonic crystal cavity

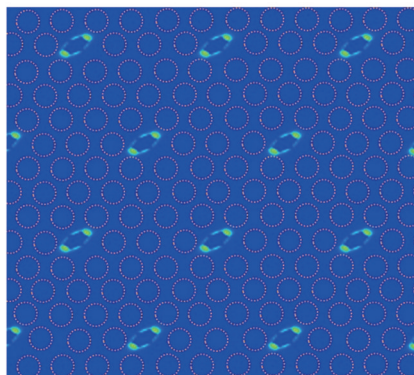


图 7 结构设计后的局部效果图

Fig.7 Simulated cavity array mode in the middle of the slab

子晶体结构设计后的局部效果图。

由于硫系玻璃与传统氧化物玻璃在物理、化学性质上有较大的差别,在制备光子晶体样品时,可采用热蒸发或者磁控溅射法制备 1~2 μm 级薄膜,然后利用紫外光刻配合离子刻蚀,再经过化学腐蚀步骤(利用碱性溶液)掏空牺牲层制备设计的光子晶体结构^[28]。此外,由于硫系玻璃的软化温度很低(通常小于 300 ℃),还可以采用纳米压印的方法制备光子晶体模板,纳米压印的方法制备精度高,速度快,且成本低廉,并已被成功应用于硫系玻璃光波导的制备^[29]。

4 结 论

制备了 Tm³⁺离子掺杂硫系玻璃作为实验样品,并进行折射率和光谱特性测试。800 nm 抽运源激励下实

验测得玻璃样品在 $3.73\ \mu\text{m}$ 附近具有较好的中红外荧光特性。为了使该处中红外发光得到增强,在块体玻璃样品中引入光子晶体微腔,利用缺陷模来增强其自发辐射的几率。通过监测光子晶体样品的 TM 模的品质因子 Q 和 Purcell 放大因子来优化光子晶体微腔阵列的晶格周期和占空比等参数。模拟结果显示表明在设计的光子晶体样品中, Purcell 放大因子可达到块体材料的 50 倍以上,光子晶体结构的引入能够有效增强中红外发光。该研究结果对实现高效率中红外光源器件具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 I T Sorokina, K L Vodopyanov. Solid-State Mid-Infrared Laser Sources [M]. Topics in Applied Physics - Springer, 2003, 89: 221-224.
- 2 C Xia, M Kumar, O P Kulkarni, M N Islam, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation to $4.5\ \mu\text{m}$ in ZBLAN fluoride fibers by nanosecond diode pumping [J]. Opt Lett, 2006, 31(17): 2553-2555.
- 3 A B Seddon, Z Tang, D Furniss, S Sujecki, *et al.*. Progress in rare-earth-doped mid-infrared fiber lasers [J]. Opt Express, 2010, 18(25): 26704-26719.
- 4 L Bachmann, K Rosa, P D Ana, *et al.*. Crystalline structure of human enamel irradiated with Er, Cr: YSGG laser[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(2): 159-162.
- 5 Zhang Long, Chen Lei, Fan Youyu, *et al.*. Development of mid-infrared transmitting glasses window and applications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900134.
张 龙, 陈 雷, 范有余, 等. 中红外玻璃材料发展及前沿应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900134.
- 6 K Paivasaari, V K Tikhomirov, J Turunen. High refractive index chalcogenide glass for photonic crystal applications [J]. Opt Express, 2007, 15(5): 2336-2340.
- 7 E Nicoletti, G Zhou, B Jia, *et al.*. Observation of multiple higher-order stopgaps from three-dimensional chalcogenide glass photonic crystals [J]. Opt Lett, 2008, 33(20): 2311-2313.
- 8 M Olivier, J Tehahame, P Němec, *et al.*. Structure, nonlinear properties, and photosensitivity of $(\text{GeSe}_2)_{100-x}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_x$ glasses [J]. Optical Materials Express, 2014, 4(3): 525-540.
- 9 A Giesen, H Hügel, A Voss, *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. Appl Phys B, 1994, 58(5): 365-372.
- 10 J Heo. Optical characteristics of rare-earth-doped sulphide glasses [J]. J Mater Sci Lett, 1995, 14(14): 1014-1016.
- 11 J D Joannopoulos, S G Johnson, J N Winn, *et al.*. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light [M]. Princeton University Press, 2011: 135-155.
- 12 H Ruda, N Matsuura. Properties and Applications of Photonic Crystals [M]. Optical Properties of Condensed Matter and Applications, John Wiley & Sons Ltd, 2006: 197-214.
- 13 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 14 P R Villeneuve, S Fan, J Joannopoulos. Microcavities in photonic crystals: Mode symmetry, tunability, and coupling efficiency [J]. Phys Rev B, 1996, 54(11): 7837-7842.
- 15 Yang Zhongmin, Xu Shiqing, Jiang Zhonghong, *et al.*. Overview of research on magneto-optical glass applied to all-optical fiber sensor [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2003, 21(2): 115-122.
杨中民, 徐时清, 姜中宏, 等. 全光纤传感用磁光玻璃的研究进展[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(2): 115-122.
- 16 V Kopp, B Fan, H Vithana, *et al.*. Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystals [J]. Opt Lett, 1998, 23(21): 1707-1709.
- 17 Che Ming, Zhou Yunsong, Wang Fuhe, *et al.*. Density of states and local density of states of two-dimensional photonic crystals with cylinder scatter in square lattice [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(12): 1847-1851.
车 明, 周云松, 王福和, 等. 圆柱形散射子二维光子晶体的态密度与局部态密度[J]. 光学学报, 2006, 26(12): 1847-1851.
- 18 M Li, P Zhang, J Li, *et al.*. Directional emission from rare earth ions in inverse photonic crystals [J]. Appl Phys B, 2007, 89(2-3): 251-255.
- 19 R Dalichaouch, J Armstrong, S Schultz, *et al.*. Microwave localization by two-dimensional random scattering [J]. Nature, 1991, 354: 53-55.
- 20 X H Wang, R Z Wang, B Y Gu, *et al.*. Decay distribution of spontaneous emission from an assembly of atoms in photonic crystals

- with pseudogaps [J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(9): 093902.
- 21 Z D Liu, Y Lin, S Y Zhu, *et al.*. The virtual-photon effects in spontaneous emission from an atom embedded in a photonic band gap structure [J]. Phys Lett A, 1999, 264(2): 137-141.
- 22 P Q Zhang, S X Dai, X K Niu, *et al.*. Design of rare-earth-ion doped chalcogenide photonic crystals for enhancing the fluorescence emission [J]. Opt Commun, 2014, 322: 123-128.
- 23 F Wang, D P Landau. Efficient, multiple-range random walk algorithm to calculate the density of states [J]. Phys Rev Lett, 2001, 86(10): 2050-2053.
- 24 T N Oder, K H Kim, J Y Lin, *et al.*. III-nitride blue and ultraviolet photonic crystal light emitting diodes [J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(4): 466-468.
- 25 Y Akahane, T Asano, B S Song, *et al.*. Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity [J]. Opt Express, 2005, 13(4): 1202-1214.
- 26 X K Niu, P Q Zhang, Y X Zhou, *et al.*. Modeling and simulation of mid-IR amplifying characteristics of Tm³⁺-doped chalcogenide photonic crystal fibers [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 63: 178-183.
- 27 Luan Pigang, Chen Qichang. Photonic Crystals [M]. Taiwan: Wu-Nan Book Press, 2007: 22-23.
栾丕纲, 陈启昌. 光子晶体[M]. 台湾: 五南图书出版社, 2007: 22-23.
- 28 J Li, X Shen, J Q Sun, *et al.*. Fabrication and characterization of Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ chalcogenide glass rib waveguides for telecommunication wavelength [J]. Thin Solid Film, 2013, 545: 462-465.
- 29 T Han, S Madden, D Bulla, *et al.*. Low loss Chalcogenide glass waveguides by thermal nano-imprint lithography [J]. Opt Express, 2010, 18(18): 19286-19291.

栏目编辑: 张浩佳