

文章编号: 1001-3806(2009)06-0611-04

掺 Yb³⁺ 光纤放大器的自发辐射噪声分析

赵振宇^{1,2}, 段开栋^{1*}, 王建明^{1,2}, 赵卫¹, 王屹山¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710119 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了研究掺 Yb³⁺ 光纤放大器中自发辐射噪声分布情况, 利用离散化的方法求解掺 Yb³⁺ 光纤放大器的速率方程, 理论研究了不同的抽运方式、端面反射率、抽运功率以及有无滤波等条件下, 端面抽运掺 Yb³⁺ 光纤放大器中自发辐射的功率放大特性。结果表明, 不同边界条件下的自发辐射功率差异较大; 通过减少光纤端面的非涅耳反射和利用滤波技术等方法, 可有效抑制光纤激光放大器中自发辐射噪声的功率放大。

关键词: 光纤放大器; 自发辐射; 噪声; 掺 Yb³⁺ 光纤放大器; 高功率

中图分类号: O432.1⁺2; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.015

Comprehensive analysis of amplified spontaneous emission noise of Yb³⁺-doped fiber amplifier

ZHAO Zhen-yu^{1,2}, DUAN Kai-liang¹, WANG Jian-ming^{1,2}, ZHAO Wei¹, WANG Yi-shan¹

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the distribution of spontaneous noise in a Yb³⁺-doped fiber amplifier (YDFA), the power gain characteristics of amplified spontaneous emission under conditions of different pump schemes and power, end surface reflectivity and spectral filter were studied by solving the discrete rate equation. The results show that the power of amplified spontaneous emission is different under different boundary conditions, and that the power amplification of the amplified spontaneous emission can be suppressed effectively by reducing the fiber surface reflectivity and using a properly selected spectral filter.

Key words: fiber amplifier; amplified spontaneous emission; noise; Yb³⁺-doped fiber amplifier; high power

引言

光纤放大器因其结构紧凑、抽运效率高、光束质量好等优点得到了广泛地应用。早期对光纤放大器的研究因光通信的发展需要集中于掺铒光纤放大器^[1-5], 随着对其它波段激光应用需求的增长, 掺其它稀土元素的光纤放大器受到了越来越多地关注, 掺 Yb³⁺ 光纤放大器就是其中重要的一种。Yb³⁺ 具有很宽的吸收谱和荧光发射谱, 能够提供 970nm ~ 1200nm 光谱范围内的信号光放大。另外, Yb³⁺ 上能级荧光寿命长, 具有简单的二能级结构, 量子效率高, 不存在激发态吸收和高浓度淬灭等问题, 可以实现高浓度掺杂。这些特点对获

得大功率激光输出十分有益, 因此掺 Yb³⁺ 光纤放大器在实现高功率输出方面备受关注^[6-7]。

掺 Yb³⁺ 光纤放大器工作在高功率放大状态时, 放大器噪声是影响放大器输出功率的重要因素之一。掺 Yb³⁺ 光纤放大器中噪声的来源主要包括光子粒子性产生的量子噪声、外界环境影响产生的机械噪声、放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 噪声、信号光与 ASE 之间的信号放大自发辐射 (signal-amplified spontaneous emission, S-ASE) 拍频噪声和不同频段 ASE 之间的 ASE-ASE 拍频噪声等^[8-9], 其中的 ASE 噪声对输出功率特性影响较大。在抽运光功率较高时, ASE 在光纤内传播过程中不断放大, 并由于光纤端面反射的存在, 产生寄生振荡, 使得 ASE 功率显著增加, 严重影响放大器功率输出和稳定性^[10]。

作者研究了端面抽运的掺 Yb³⁺ 光纤放大器在连续工作方式下, 自发辐射功率放大与抽运方式、滤波技术、端面反射率及抽运功率之间的变化关系。利用离散化的方法求解掺 Yb³⁺ 光纤放大器的速率方程, 理论

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目 (0729591213)

作者简介: 赵振宇 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事光纤放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: Kl.duan@163.com

收稿日期: 2008-10-08; 收到修改稿日期: 2008-11-25

研究了 ASE 噪声在光纤内的功率放大情况。结果表明,抽运方式主要影响光纤内 ASE 的功率分布,对功率大小影响较小;通过降低端面反射率和利用滤波技术可以很好地抑制 ASE 功率。这些研究结果可以对光纤放大器的优化设计提供参考。

1 放大自发辐射噪声理论分析与数值模拟

1.1 Yb³⁺ 吸收与发射截面及稳态速率方程

掺 Yb³⁺ 光纤中 Yb³⁺ 的吸收和发射截面见图 1^[11]。

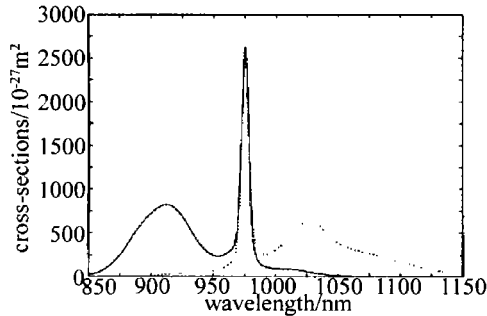


Fig. 1 Absorption (solid) and emission (dotted) cross sections of Yb in germanosilicate glass

由图 1 可知, Yb³⁺ 在 976nm 和 1030nm 处有两个发射峰,在 976nm 波长处有很高的吸收峰,对该波长的光吸收很强,理论计算自发辐射增益为负,因此,在该波长不能形成 ASE。而在 1000nm ~ 1100nm 波长范围内, Yb³⁺ 有较为显著的发射截面,因而在抽运功率较大时,会在这一波段产生较明显的放大的自发辐射。

计算光纤放大器内 ASE 的功率分布时,可利用放大器的速率方程理论^[12]。掺 Yb³⁺ 光纤放大器的稳态速率方程如下:

$$N_2(z)/N = \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{a,p}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \sum_{K=1}^{10} \frac{\Gamma_s}{hcA} \sigma_a(\lambda_K) [P_{ASE}^+(z, \lambda_K) + P_{ASE}^-(z, \lambda_K)] + \frac{\Gamma_s}{hcA} \sigma_a(\lambda_s) [P_s^+(z, \lambda_s) + P_s^-(z, \lambda_s)] \right\} / \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \sum_{K=1}^{10} \frac{\Gamma_s}{hcA} \sigma_a(\lambda_K) [P_{ASE}^+(z, \lambda_K) + P_{ASE}^-(z, \lambda_K)] + \frac{\Gamma_s}{hcA} \sigma_a(\lambda_s) [P_s^+(z, \lambda_s) + P_s^-(z, \lambda_s)] \right\} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p \{ \sigma_{a,p} N - (\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p}) \times N_2(z) \} P_p^\pm(z) - \alpha(z, \lambda_p) P_p^\pm(z) \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_s \{ [\sigma_e(\lambda_K) + \sigma_a(\lambda_K)] N_2(z) - \sigma_a(\lambda_K) N \} P_s^\pm(z, \lambda_K) + \Gamma_s \sigma_e(\lambda_K) N_2(z) P_0(\lambda_K) - \alpha(z, \lambda_p) P_s^\pm(z, \lambda_K) \quad (3)$$

$$P_p^+(0, \lambda_p) = 0, P_p^-(L, \lambda_p) = P_p^0, \\ P_s^+(0, \lambda_s) = P_{in}, P_s^-(L, \lambda_s) = 0, \quad (4) \\ P_{ASE}^+(0, \lambda_K) = 0, P_{ASE}^-(0, \lambda_K) = 0$$

式中, λ_K ($K=1, 2, \dots, 10$) 为 1000nm ~ 1100nm 波段等分为 10 段后每段的中心波长; $\lambda_p = 976$ nm 为抽运光波长; $\lambda = 1064$ nm 为信号光波长; Γ_s, Γ_p 为信号光和抽运光的功率填充因子; $P_p^+(z), P_p^-(z)$ 为正向和反向传播的抽运光纵向功率分布函数; $P_s^+(z, \lambda_s), P_s^-(z, \lambda_s)$ 为正向和反向传播的信号光纵向功率分布函数; $P_{ASE}^+(z, \lambda_K), P_{ASE}^-(z, \lambda_K)$ 为正向和反向传播的 ASE 纵向功率分布函数; $\sigma_{a,p}, \sigma_{e,p}$ 为抽运光的吸收截面和发射截面; σ_a, σ_e 为信号光的吸收截面和发射截面; τ 为上能级电子寿命; h 为普朗克常数; c 为真空中的光速; α 为损耗因子; N 为掺杂浓度; N_2 为上能级粒子数; 其余各参量值选择见文献[13]。

由于掺 Yb³⁺ 光纤发射截面对应的 ASE 光谱较宽,因此上面的方程中已将计算光谱离散化,计算中把 ASE 谱在 1000nm ~ 1100nm 波长范围上分为 10 段,每段宽为 10nm,这样可以使得信号光与 ASE 光具有相同形式的传输方程。

1.2 模拟结果及理论分析

通过求解上面的稳态速率方程,可以数值分析光纤放大器在不同的边界条件下,光纤内 ASE 的功率放大情况。在下面的模拟计算中假设光纤长度为 10m,总抽运功率为 100W,信号光功率为 5W。以下各图中点线为抽运光,虚线为反向传输 ASE,实线为正向传输 ASE,点划线为 ASE 总功率。

图 2 为光纤端面为垂直平面(存在 4% 菲涅耳反射)的情况下光纤内 ASE 的功率分布情况,3 个小图对应的抽运方式分别为反向抽运、正向抽运和双端抽运。

从图 2a 可以看出,在反向抽运方式下,光纤内自发辐射反向传输的 ASE 分布范围较大(0m ~ 7.8m),正向传输的 ASE 在光纤的后部分(7.8m ~ 10m)才表现出来。ASE 总功率(反向 ASE 功率与正向 ASE 功率的和)分布极大值位于光纤左右两端,均为 31.83W,最小值为 12.24W,位于光纤 7.8m 处。从图 2b 看出,在正向抽运方式下,正向和反向传输的 ASE 分布情况与图 2a 相反,光纤内正向传输的 ASE 分布范围较大(2.1m ~ 10m),功率极大值位于光纤两端均为 36.96W,最小值为 14.22W,位于光纤 2.1m 处。由图 2c 可以看出,在双向抽运的情况下,双端抽运功率相同时,正向和反向传输 ASE 有较为对称的分布,ASE 总功率在光纤内的分布相对均匀,ASE 总功率极大值

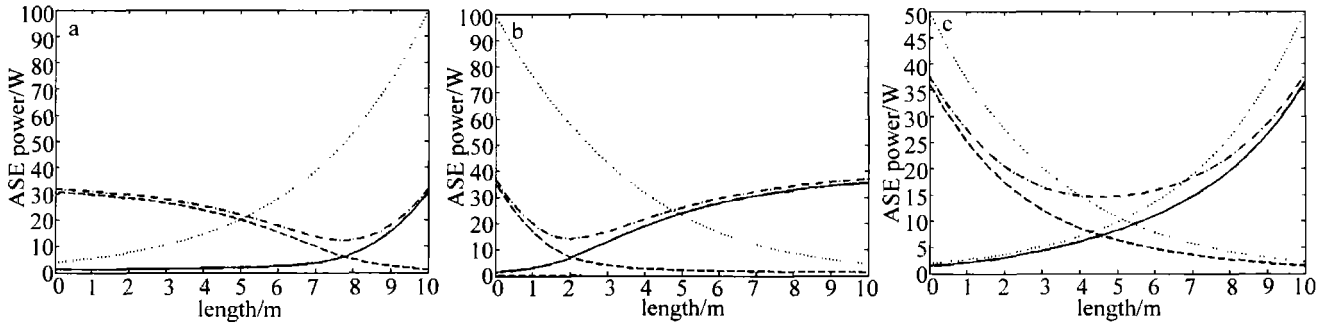


Fig. 2 ASE power distribution in the fiber with different pumping way, when the reflectivity of the fiber end surface is 4%
a—reverse pump b—forward pump c—bidirectional pump

位于光纤左右两端,均为 37.87W,最小值为 14.56W,位于光纤 4.5m 处。图 2c 中 ASE 总功率最小值不在光纤中心,而是偏向光纤左端,这是由于 ASE 受到信号光的影响,最小值向信号光入射方向偏移。由图 2 的 3 个小图比较可知,在相同的抽运功率条件下,抽运

方式影响 ASE 在光纤内的功率分布和大小,比较而言,反向抽运具有相对较小的功率分布。实际工作中,采用反向抽运方式对于抑制 ASE 噪声较为理想。

图 3 为假设施加一定的滤波技术后,在光纤端面反射率为 4% 的条件下,光纤内 ASE 的功率分布情况,

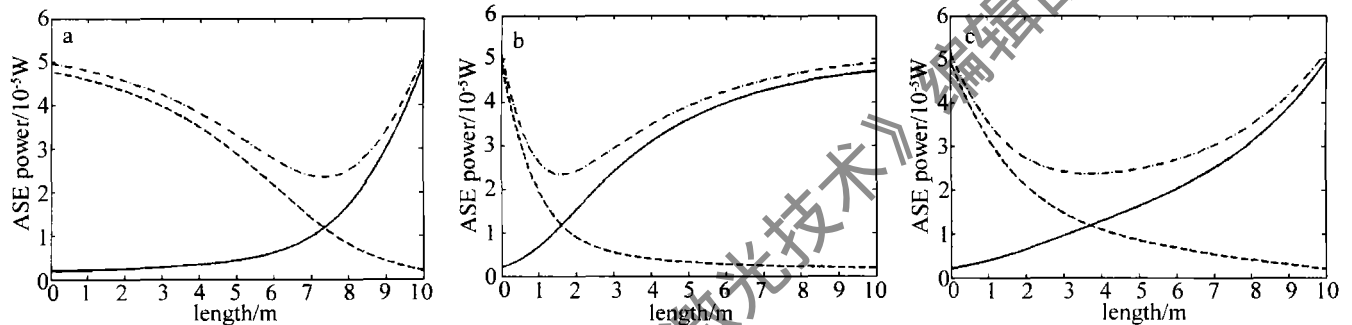


Fig. 3 ASE power distribution in the fiber with different pumping way under filter condition
a—reverse pump b—forward pump c—bidirectional pump

滤波后光纤的通透谱假设为 1060nm ~ 1070nm,3 个小图的抽运方式分别为反向抽运、正向抽运和双端抽运。由图 3a 可知,采用滤波技术后,正向抽运时,正向传输 ASE 功率最大值为 4.931×10^{-5} W,反向传输 ASE 功率最大值为 4.774×10^{-5} W,ASE 总功率极大值位于光纤左右两端,分别为 4.964×10^{-5} W 和 5.128×10^{-5} W。图 3b 中,正向传输 ASE 功率最大值为 4.864×10^{-5} W,反向传输 ASE 功率最大值为 5.088×10^{-5} W,ASE 总功率极大值位于光纤左右两端,分别为 5.292×10^{-5} W 和 5.058×10^{-5} W。图 3c 中,正向传输 ASE 功率最大值为 5.31×10^{-5} W,反向传输 ASE 功率最大值为 5.335×10^{-5} W,ASE 总功率极大值位于光纤左右两端,均为 5.549×10^{-5} W。比较图 2 和图 3 可以看出,在 3 种抽运方式下,施加滤波技术后,光纤内 ASE 功率均降低了 6 个数量级。这是由于在光纤内施加适当的滤波技术后,限制了信号光波段之外的 ASE 在光纤内传播,把 ASE 光谱约束在一个较窄的范围内,这样可抑制 ASE 在光纤内的功率放大。实际工作中,在普通光纤内实现全程滤波比较困难,但使用带隙型光子晶体光纤可以很好的达到滤波的效果^[14]。

图 4 以双向抽运方式为例,模拟分析光纤端面反

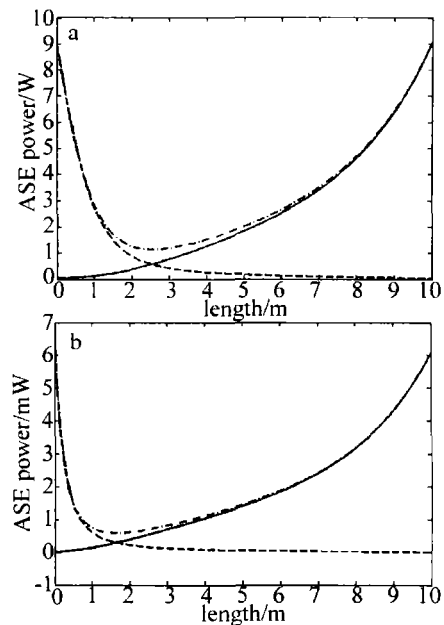


Fig. 4 ASE power distribution in the fiber with bidirectional pump under difference end surface reflections
a—the reflectivity is 4% b—the reflectivity is 0%

射率对光纤内 ASE 功率分布的影响。图 4a 和图 4b 对应的端面反射率分别为 4% 和 0%。由图 4a 可以看出,ASE 总功率极大值位于光纤左右两端,分别为

9.064W和9.063W,最小值为1.142W。图4b中,ASE总功率极大值位于光纤左右两端,分别为 6.621×10^{-3} W和 6.052×10^{-3} W,最小值为 5.856×10^{-4} W。相对于图2c,图4a中ASE功率降低1个数量级,图4b中ASE功率降低了4个数量级。图4的计算结果表明,减小光纤端面反射率,可以有效抑制光纤内ASE的功率放大。这是由于减少端面反射后,可以有效抑制寄生振荡的形成,从而可抑制ASE的谐振放大。因此端面抽运的光纤放大器,需要对光纤端面进行角度处理,以抑制ASE振荡放大的形成。

图5所示为双端抽运方式下,光纤内正向传输ASE输出功率随抽运功率的变化情况。从图5a可以

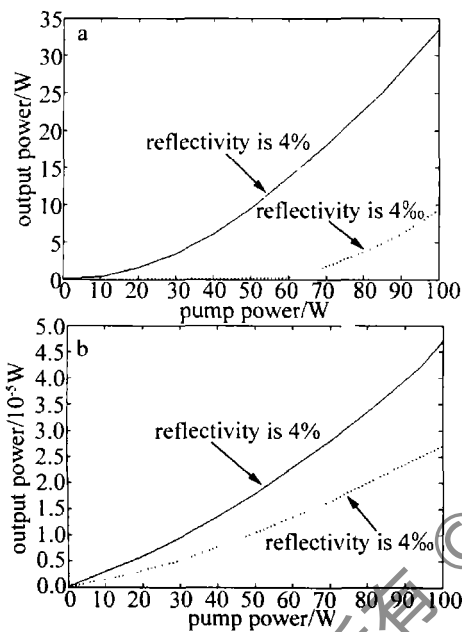


Fig. 5 ASE output power along with pumping power under double-end pumping way
a—without filter b—with filter

看出,端面反射率为4%时,ASE功率阈值约为5W,抽运功率高于5W后,ASE功率随抽运功率持续增长,抽运功率100W时达到33.5W。在端面反射率降低为4‰时,ASE功率阈值出现在60W附近,之后ASE功率随抽运功率持续增大,抽运功率100W时达到了9.3W。图5b为施加滤波技术后,光纤通透谱为1060nm~1070nm,正向ASE输出功率随抽运功率的变化。在抽运功率100W时,端面反射为4%和端面反射为4‰时,正向ASE输出功率最大值分别只有 4.71×10^{-5} W和 2.698×10^{-5} W,ASE噪声功率受到了有效的抑制。在高功率抽运条件下,光纤端面的微弱反射($R=4‰$)也会造成较高的ASE功率输出,采用适当的滤波技术可以有效地抑制ASE噪声功率。

当抽运功率一定时,信号功率的不同也影响了ASE噪声功率,图6所示为抽运功率为100W时,ASE

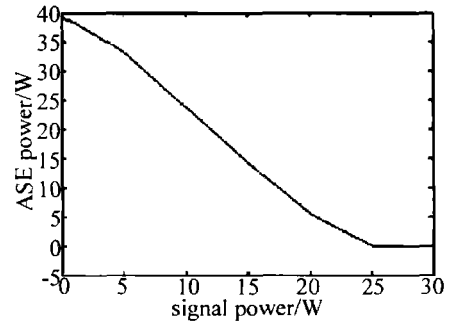


Fig. 6 ASE output power along with signal power under double-end pumping way

噪声功率随信号功率的变化曲线。在无信号输出的情况下,ASE功率为39.4W,随着信号功率的增加,ASE被抑制,噪声功率大体呈线性关系减小,当信号功率达到25W时,功率已经降到瓦级以下,这意味着由ASE所引起的寄生振荡被抑制,对放大器的输出功率变得很小。

2 结论

通过求解离散化的速率方程,对端面抽运的掺Yb³⁺光纤放大器的自发辐射噪声功率放大特性进行了理论模拟,分析了后向、前向和双端抽运3种不同的端面抽运方式、不同的端面反射率、不同的抽运功率以及有无滤波等条件下,放大的自发辐射噪声的变化规律。根据分析结果提出了抑制该噪声的可行途径,对光纤进行端面处理减少光纤端面的菲涅耳反射和使用带隙型光子晶体光纤或采用反向抽运,可有效地抑制光纤激光放大器中放大的自发辐射噪声。在后续的实验中将对模拟结果进行相关的实验验证,并对其它噪声对光纤放大器的影响进行深入地研究分析。

参考文献

- [1] SONG F, SHU R Y, FU Q, *et al.* Gain characteristics of high-concentration Er³⁺/Yb³⁺ co-doped phosphate fiber amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(11): 5228-5232 (in Chinese).
- [2] WEN S. Distributed erbium-doped fiber amplifier for soliton transmission [J]. *Opt Lett*, 1994, 19(1): 22-24.
- [3] HE H J, GU W Y, LI G R, *et al.* Analyses on stable and transient gain in erbium-doped fiber amplifier [J]. *Acta Photonic Sinica*, 1996, 25(3): 267-272 (in Chinese).
- [4] GILES C R, DESURVIRE E H. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(2): 147-154.
- [5] ZHUANG M L, ZHAO S H, DONG S F, *et al.* Numerical analysis of the population distribution characteristics in Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-clad fiber amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 279-282 (in Chinese).
- [6] LIEM A, LIMPET J, ZELLMER H, *et al.* 100W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(17): 1537-1539.

(下转第618页)

常数为3,5,8时,带隙基本没有变化,即夹层的介电常数低于基质时,带隙及带隙内的缺陷模均保持不变。图8为中间夹层的介电常数是8和13时光子晶体的透射谱,从图中可以看出,夹层的介电常数高于基质比低于基质时带隙内的缺陷模明显地增大。

3 结论

用FDTD法计算了由包层介质柱/基质光子晶体与空气柱/基质光子晶体组合的光子晶体的传输特性,发现这种组合的光子晶体的带隙宽度为 $0.222(1/\lambda)$,远大于单一结构的光子晶体带隙(介质柱/基质光子晶体的带隙宽度为 $0.182(1/\lambda)$,空气柱/基质光子晶体的带隙宽度为 $0.056(1/\lambda)$)。调节包层介质柱外半径的大小,可以控制带隙的宽度;调节包层介质柱内半径的大小、内柱或者夹层的介电常数,不改变带隙的宽度,却可以使带隙内的缺陷模发生明显的变化,尤其是增大夹层的介电常数大于基质的介电常数时,带隙内的通带更加明显。如果保持介质柱的外半径不变,这种光子晶体的带隙相当稳定,通过调节包层介质柱内半径的大小,内柱或夹层的介电常数,就可以使原来处于带隙内的某一频率波透过光子晶体。为更好地实现光子晶体的导光和滤波作用提供了理论基础,可以用来做滤波器、光开关和波导等。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] MALDOVAN M, THOMAS E, CARTER C. Layer-by-layer diamond-like woodpile structure with a large photonic band gap [J]. A P L, 2004, 84(3): 362-364.
- [4] FENG Sh Sh, SHEN L F, HE S L. A two-dimensional photonic crystal formed by a triangular lattice of square dielectric rods with a large absolute band gap [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(5): 1540-1544 (in Chinese).
- [5] LI X Ch, LIANG H Y, YI X Y, *et al.* The study of two-dimensional composite materials with wide band gap [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2784-2790 (in Chinese).
- [6] GUAN Ch Y, YUAN L B. Analysis of band gap in honeycomb photonic crystal heterostructure [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(3): 1244-1248 (in Chinese).
- [7] QIU M. Effective index method in heterostructure slab waveguide based two-dimensional photonic crystals [J]. A P L, 2002, 81(7): 1163-1165.
- [8] XIAO S Sh, SHEN L F, HE S L. Large complete band gap at low and high frequencies in a two-dimensional anisotropic photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(12): 2858-2865 (in Chinese).
- [9] ZHAO M M, LÜ Y W, XU J X. Effect of rotation on photonic band gap of two-dimensional square lattice photonic crystal with hollow rod [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 1061-1066 (in Chinese).
- [10] FANG Y T, SHEN T G, TAN X L. Absolute photonic band gaps of 2-D cubic compound lattice [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 344-351 (in Chinese).
- [11] ANDERSON C M, GIAPIS K P. Larger two-dimensional photonic band gaps [J]. Phys Rev Lett, 1996, 77(4): 2949-2952.
- [12] LI Zh Y, GU B Y, YANG G Zh. Large absolute band gap in 2-D anisotropic photonic crystal [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(12): 2574-2578.
- [13] WANG B Zh. Calculation electromagnetic [M]. Beijing: Science Press, 2002: 52-56 (in Chinese).
- [14] TANG B Sh, YIN G W, XU J L, *et al.* Study on the transmission spectra of two-dimension photonic crystals with layered composite medium cylinder [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 127-130 (in Chinese).
- [7] JEONG Y, NILSSON J, SAHU J K, *et al.* Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264W of output power [J]. Opt Lett, 2005, 30(5): 459-461.
- [8] GU J X, XU C H. Comprehensive analysis of noise characteristics of EDFA [J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(5): 54-58 (in Chinese).
- [9] ZHAN Y, ZHENG Y, ZHAO Y H, *et al.* The gain and noise characteristics of double cladding ytterbium-doped fiber amplifiers at different pump modes [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 50-53 (in Chinese).
- [10] ZHAO Z Y, DUAN K L, WANG J M, *et al.* Experimental study of characteristics of high power photonic crystal fiber amplifier [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(10): 6335-6339 (in Chinese).
- [11] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [12] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(9): 1570-1577.
- [13] WU Z L, CHEN G F, WANG X H, *et al.* Numerical analysis of Yb³⁺ doped double clad fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3): 332-336 (in Chinese).
- [14] FÉVRIER S, GAPONOV D D, ROY P, *et al.* High-power photonic-bandgap fiber laser [J]. Opt Lett, 2008, 33(9): 989-991.

(上接第614页)