

· 光学设计 ·

全光纤带通声光可调谐滤波器特性的研究

徐春霞, 吴良英

(北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 提出一种全光纤带通声光可调谐滤波器结构, 通过在包层腐蚀的单模光纤中引入模式转换器, 来阻断纤芯中原本传输的基模, 并同时将在包层耦合至纤芯中。结果表明, 增加声横波频率, 带通滤波器谐振峰出现“蓝移”现象, 并且, 滤波器谐振峰随着包层半径的增大而减小, 声横波功率的增加可以一定程度增大谐振波峰。在包层半径 $r_c=32.5 \mu\text{m}$, 声横波功率 $P_a=20 \text{ mW}$, 频率 $f_a=1.5 \text{ MHz}$ 处获得 3 dB 带宽为 2.13 nm 的带通滤波; 调节声横波频率 f_a 从 1.2 MHz 至 1.5 MHz, 可实现 85.18 nm 波长范围的调谐, 该波长可调谐带通滤波器可以用在增益带宽较大的光纤激光器中。

关键词: 单模光纤; 模式转换; 带通滤波器; 声光可调谐滤波器

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0024-05

Research on All-fiber Band-pass Acousto-optic Tunable Filter

XU Chun-xia, WU Liang-ying

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: An all-fiber band-pass acousto-optic tunable filter is proposed. By introducing a mode converter into a cladding-etched single-mode fiber, the fundamental mode transmitted in the core originally is blocked and the cladding mode is coupled in the fiber core at the same time. The results indicate that the band-pass filter has a blue shift when acoustic frequency increases, and the resonant peak of the filter decreases with the increase of cladding radius, moreover, the increase of the acoustic power can also increase the resonance peak of the filter to some extent. Meanwhile, a band pass resonance peak with 3 dB bandwidth of 2.13 nm is obtained when the cladding radius is kept at $32.5 \mu\text{m}$, and the acoustic power and frequency are fixed at 20 mW and 1.5 MHz respectively. The tunable wavelength of 85.18 nm can be achieved when the acoustic frequency is adjusted from 1.2 MHz to 1.5 MHz. The device has the potential to be applied into the fiber lasers with large gain bandwidth.

Key words: single-mode fiber; mode conversion; band-pass filter; acousto-optic tunable filter

全光纤激光器由于易集成、光束可控且稳定等优点而在光纤通信网络中得到广泛应用以及快速发展^[1]。因此, 迫切要求具有更丰富的滤波特性和更便捷的调谐方式的光纤带通滤波器与之适应, 而带通声光可调谐滤波器因其调谐范围宽、调谐速度快、插入损耗低、可实现动态增益调节而获得国内外研究者们广泛的关注^[2-7]。

目前, 常见的光纤带通声光可调谐滤波器利用

的光纤主要有双模光纤、普通单模光纤以及光纤光栅。H E Engan 等人于 1988 年^[8]利用双模光纤实现了带通声光滤波器, 但是双模光纤与光纤通信网络中使用的单模光纤不兼容, 且具有较大的插入损耗和偏振相关性; 2006 年, 曹岱宗等人^[9]采用单模光纤中间插入基模阻波器的方法实现带通滤波, 该结构滤波器的 3 dB 滤波带宽为 4.029 nm, 具有较大的插入损耗和边模抑制比。2013 年, Qiang Zhang 等研究

者^[10]通过交错拼接单模光纤光栅的方式实现3 dB滤波带宽12.3 nm的全光纤声光可调谐带通滤波器,2015年,Hao Zhang等人^[11]在此结构下通过将光栅换成普通单模光纤实现-206.07 nm/MHz声波频率下152.9 nm的调谐带宽,然而这种结构在实现工艺上较为复杂,不利于广泛的应用。2016年,刘超等人通过氢氟酸腐蚀来改变单模光纤包层半径的大小,实现较小声波频率下对C波段的带阻滤波,该滤波器结构简单,能量损耗低,且可调谐范围宽,具有较大的应用范围^[12-14]。

文中针对基于包层腐蚀的单模光纤提出全光纤带通声光可调谐滤波结构并展开研究。详细分

析了该结构滤波器的基模(HE₁₁)与包层模(HE₂₁)模式耦合特性,包括模式间耦合效率与单模光纤包层半径、光波波长以及加载的声横波功率之间的关系;随后深入研究了加载不同频率 f_a 以及功率 P_a 的声横波下,不同结构的全光纤带通声光可调谐的调谐特性,讨论了单模光纤包层半径、声横波频率与功率对滤波器谐振峰的影响。

1 结构模型与原理

全光纤带通声光可调谐滤波器的结构如图1所示。

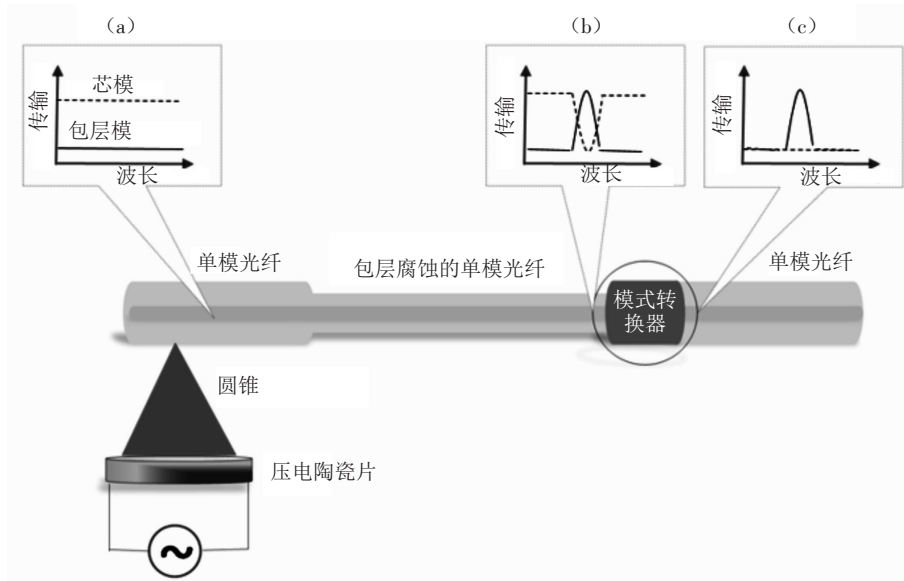


图1 全光纤带通声光可调谐滤波器的结构示意图

该器件由包层腐蚀的单模光纤(etched cladding SMF)、圆锥(silicon horn)、压电陶瓷片(PZT)以及模式转换器(MC)组成。压电陶瓷片在加载电信号时上下振动,通过圆锥传导作用于单模光纤上,产生沿光纤轴向传输的声横波。这种沿光纤轴向传输的声横波会引起包层腐蚀的单模光纤的腐蚀部分产生周期性的微弯,进而改变该包层腐蚀的单模光纤的折射率分布。图1中(a)为输入光进入单模光纤包层腐蚀区域前在包层与纤芯中的分布示意图;进入腐蚀区域后,单模光纤中原有的基模 HE₁₁ 在相位匹配谐振波长处极易被耦合至包层模 HE₂₁ 中,造成纤芯中基模 HE₁₁ 在谐振波长处产生明显的下陷谐振峰,而包层中模式 HE₂₁ 产生明显的上凸谐振峰,如图1中(b)所示;此时,通过模式转

换器,原本传输在光纤纤芯中存在下陷谐振峰的基模 HE₁₁ 被完全阻断,而包层中模式 HE₂₁ 几乎可以全部通过,同时将在光纤包层中传输的包层模 HE₂₁ 重新耦合至光纤纤芯模中,这样光纤的传输透射谱在谐振波长处存在一个明显的谐振峰,如图1中(c)所示,从而形成带通滤波的特性。谐振波长 λ 与声横波波长 Λ_a 满足的相位匹配条件如下^[15]

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{\text{eff}}^{11} - n_{\text{eff}}^{21}) - \frac{2\pi}{\Lambda_a} = 0 \quad (1)$$

其中, n_{eff}^{11} 和 n_{eff}^{21} 分别为基模 HE₁₁与包层模 HE₂₁的有效折射率。光纤包层模 HE₂₁与纤芯模 HE₁₁在单模光纤包层腐蚀处及模式转换器中满足的耦合方程为^[15]

$$\begin{aligned} \frac{dE_{11}}{dz} + iK_a e^{i\delta z} E_{21} &= 0 \\ \frac{dE_{21}}{dz} + iK_a e^{-i\delta z} E_{11} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, E_{11} 和 E_{21} 分别表示为基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的模场强度; δ 为声横波波矢和参与耦合的基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的相位失谐量; K_a 为基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数, 其表达式为^[16]

$$K_a = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} n_0 \int_A e_{11}(r, \theta) e_{21}(r, \theta) \Delta n(r, \theta) r dr d\theta \quad (3)$$

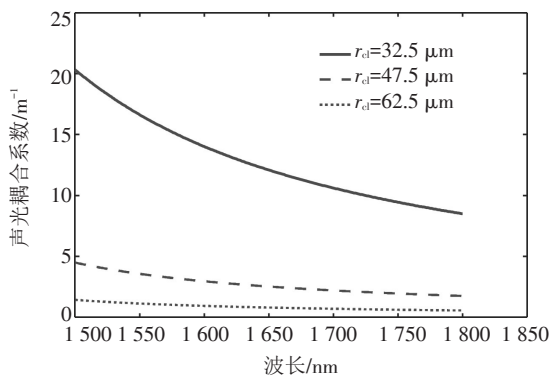
其中, ε_0 和 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率; $e_{11}(r, \theta)$ 和 $e_{21}(r, \theta)$ 分别为基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的归一化电场分布。

2 模式耦合特性分析

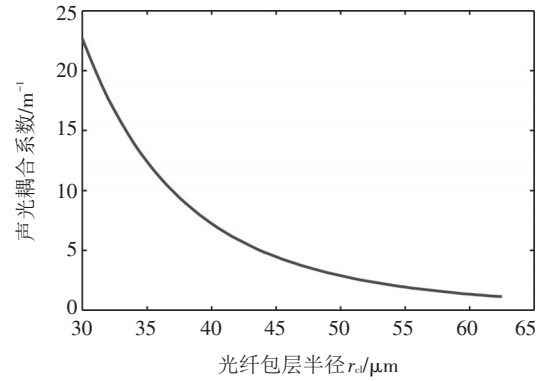
由式(3)可知, 全光纤带通声光可调谐滤波器的耦合系数 K_a 不仅与声横波在单模光纤的包层腐蚀部分所引起的折射率变化 Δn 有关, 还与单模光纤中的基模 HE_{11} 和包层模 HE_{21} 的场分布有关。随着单模光纤包层半径 r_{cl} 不断的减小, 单模光纤中基模 HE_{11} 的场分布和包层模 HE_{21} 的场分布的重叠部分也越大, 在同等声光耦合条件下, 其耦合系数也将越大^[12]。由上式可知, 基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数 K_a 与光波波长、单模光纤包层半径以及声横波功率都有关系, 因此接下去主要分析耦合系数 K_a 与三者的关系。

图2为滤波器模式耦合特性。

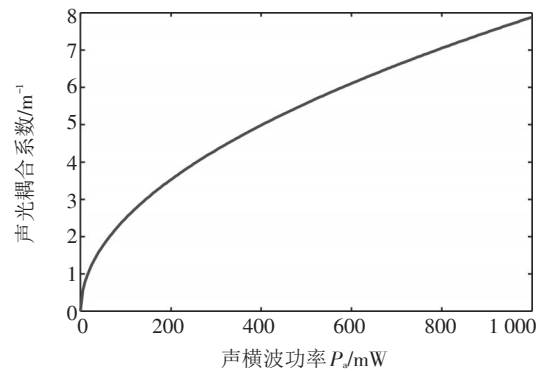
当加载功率 $P_a=20$ mW, 频率 $f_a=1.5$ MHz 的声横波时, 滤波器中基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数随波长的变化情况如图2a所示。



(a) 光波波长的影响



(b) 包层半径的影响



(c) 声横波功率的影响

图2 滤波器模式耦合特性

从图中可以看出, 随着光波波长的增加, 基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数 K_a 在逐渐下降, 说明在短波长的声光耦合系数 K_a 要大于在长波长处的声光耦合系数 K_a 。同时, 对比三个不同的单模光纤包层半径 r_{cl} 的基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数, 可以发现, 当光波波长一定时, 单模光纤包层半径 r_{cl} 为 $32.5 \mu\text{m}$ 的声光耦合系数 K_a 最大, 包层半径 r_{cl} 为 $47.5 \mu\text{m}$ 的声光耦合系数 K_a 次之, 包层半径 r_{cl} 为 $62.5 \mu\text{m}$ 的声光耦合系数 K_a 最小。

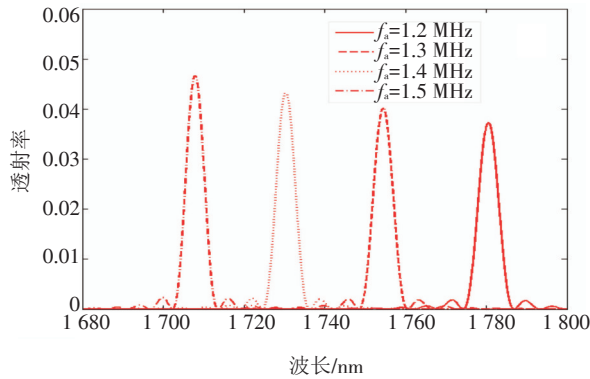
基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数 K_a 与单模光纤包层半径 r_{cl} 的关系如图2b所示, 光波波长为 1550 nm、加载功率 $P_a=20$ mW, 频率 $f_a=1.5$ MHz 的声横波。从图中可以看出, 随着单模光纤包层半径 r_{cl} 的不断变小, 基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数 K_a 呈非线性增大趋势, 这就意味着当单模光纤包层半径 r_{cl} 相对较小时, 基于包层腐蚀的单模光纤带通声光可调谐滤波器中基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合相对较强。

图2c为基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数 K_a 与声横波功率 P_a 的关系。其中,光波波长为1550 nm,单模光纤包层半径 $r_{cl}=62.5\ \mu\text{m}$,声横波频率 $f_a=1.5\ \text{MHz}$ 。从图中可以看出,随着声横波功率 P_a 的不断增长,基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数 K_a 呈非线性增长趋势,而且可以发现,当声横波功率 P_a 在相对较小的区域,基模 HE_{11} 与包层模 HE_{21} 的声光耦合系数 K_a 的增长趋势很明显相对较快。

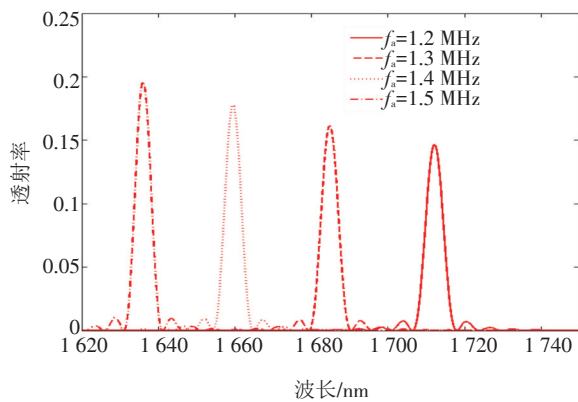
3 调谐特性分析

不同声横波频率 f_a 下,全光纤带通声光可调谐滤波器的透射光谱如图3所示。其中,声横波功率为29 mW。

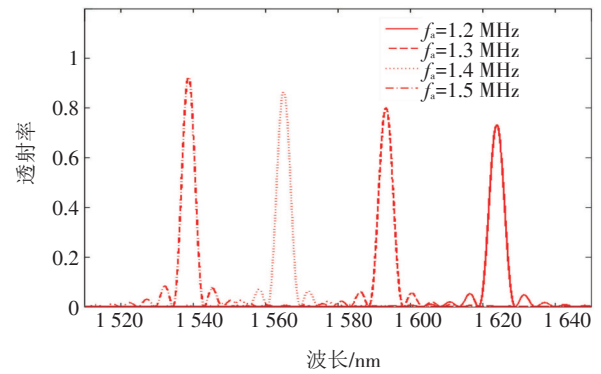
从图中可以发现,当加载声横波时,全光纤带通声光可调谐滤波器的透射光谱出现了一个带通的谐振峰,且随着声横波频率 f_a 的增加,谐振峰的中心波长逐渐向短波长区域移动,发生了“蓝移”。



(a) $r_{cl}=62.5\ \mu\text{m}$



(b) $r_{cl}=47.5\ \mu\text{m}$



(c) $r_{cl}=32.5\ \mu\text{m}$

图3 不同声横波频率 f_a 下,全光纤可调谐声光带通滤波器透射光谱

比较图3a~图3c可以发现,不同的单模光纤包层半径 r_{cl} 的滤波器所产生的谐振峰的中心波长的漂移量有所不同。当声横波频率 f_a 从1.2 MHz增加至1.5 MHz时,单模光纤包层半径 r_{cl} 为62.5 μm 的滤波器所产生的谐振峰的中心波长从1780.56 nm漂移至1707.90 nm,移动了72.66 nm;单模光纤包层半径 r_{cl} 为47.5 μm 的滤波器所产生的谐振峰的中心波长从1712.11 nm漂移至1636.03 nm,移动了76.08 nm;单模光纤包层半径 r_{cl} 为32.5 μm 的滤波器所产生的谐振峰的中心波长从1623.96 nm漂移至1538.78 nm,移动了85.18 nm。对比可以发现,当声横波频率 f_a 的调谐范围一定时,单模光纤包层半径 r_{cl} 较小的滤波器所产生的谐振峰的中心波长的漂移量相对较大,其波长调谐范围相对较宽。可以注意到,单模光纤包层半径 r_{cl} 为32.5 μm 的滤波器所产生的谐振峰的峰值要远远大于单模光纤包层半径 r_{cl} 为47.5 μm 的滤波器和单模光纤包层半径 r_{cl} 为62.5 μm 的滤波器。这是由于在等等的声横波功率 P_a 下,单模光纤包层半径 r_{cl} 为32.5 μm 的滤波器中的声光耦合比单模光纤包层半径 r_{cl} 为47.5 μm 的滤波器和单模光纤包层半径 r_{cl} 为62.5 μm 的滤波器声光耦合强。同时,可以发现,对于单模光纤包层半径 r_{cl} 为32.5 μm 的滤波器,当声横波频率 f_a 的值增加到1.5 MHz时,滤波器的峰值有所下降,这是由于此时滤波器中基模 HE_{11} 和包层模 HE_{21} 产生了过耦合的现象导致。

单模光纤包层半径及声横波频率影响带通滤波器的谐振峰和滤波波段,全光纤带通声光可调谐滤波器

的谐振波长与声横波频率 f_a 的关系如图4所示。

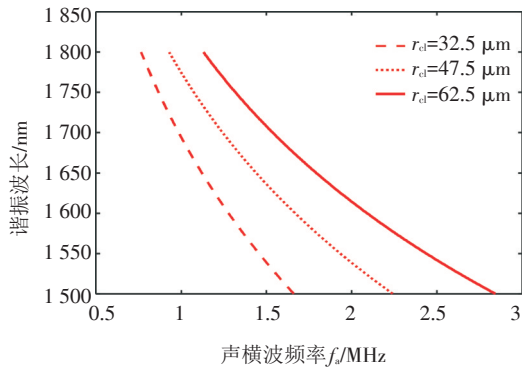


图4 谐振波长与声横波频率 f_a 的关系图

从图中可以看出,滤波器的谐振波长随声横波频率 f_a 呈非线性递减关系,且谐振波长在单模光纤包层半径 r_{cl} 较小的滤波器中的递减趋势相对较为缓慢。

声横波功率 P_a 是决定滤波器所产生的谐振峰的峰值的因素之一。图5为不同声横波功率 P_a 下的全光纤带通声光可调谐滤波器的透射光谱。其中,声横波频率 $f_a=1.5$ MHz,单模光纤包层半径 $r_{cl}=32.5$ μm 。

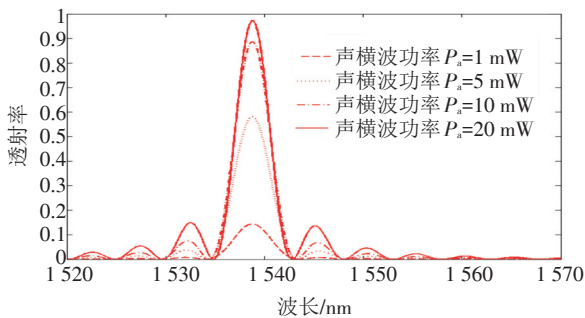


图5 $f_a=1.5$ MHz, $r_{cl}=32.5$ μm ,不同声横波功率 P_a 下的全光纤带通声光可调谐滤波器透射光谱

从图中可以看出,随着声横波功率 P_a 的增加,滤波器谐振峰的峰值在逐渐增加。当声横波功率 P_a 为1 mW时,谐振峰的峰值约为0.14;当声横波功率 P_a 为5 mW时,滤波器的谐振峰的峰值约为0.58;当声横波功率 P_a 为10 mW时,滤波器的谐振峰的峰值约为0.89;当声横波功率 P_a 为20 mW时,滤波器的谐振峰的峰值约为0.97,此时,获得3 dB带通滤波带宽为2.13 nm。改变声横波频率 f_a 从1.2 MHz至1.5 MHz,可实现85.18 nm波长范围的调谐,该波长可调谐带通滤波器可以用在增益带宽较大的光纤

激光器中。

4 结论

针对全光纤带通声光可调谐滤波器的模式耦合特性以及调谐特性展开了理论研究。对于滤波器的调谐特性,在同一单模光纤包层半径条件下,滤波器的谐振波长随着声波频率的增大而发生“蓝移”,且包层半径越小,谐振波峰的偏移距离越大,调谐范围也相对更宽。另外,通过增大声横波功率,能够增加滤波器谐振峰的峰值。在包层半径 $r_{cl}=32.5$ μm ,声横波功率 $P_a=20$ mW,频率 $f_a=1.5$ MHz处获得3 dB带宽为2.13 nm的带通滤波,可用作增益带宽较大的光纤激光器中,实现波长可调谐。文中的研究为光纤激光器在带通滤波器上提供了一个新的选择,并能够为可调谐带通声光滤波器的制作和优化设计奠定了基础。

参考文献

- [1] Cuadrado-Laborde C, Antonio Díez, Andrés M V, et al. In-fiber acousto-optic devices for laser applications[J]. Opt Photon News, 2011, 5(22): 36-41.
- [2] Hill K O, Fuji Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [3] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989; 14(15): 823-825.
- [4] Vengsarkar A M, Lemaire P L, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Lightwave Technology, 1996, 14(3): 58-65.
- [5] Xu Q, Lu S H, Liu Y, et al. Analysis of spectral characteristics for reflective tilted gratings of uniform periods[J]. Opt Commun, 2008, 281(15): 3990-3995.
- [6] Zhang Y, Liu Z G, Guo Z Y, et al. A High-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 89-91.
- [7] Wang M G, Wei H, Tong Z, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 22(7): 867-869.
- [8] Engan H E, Kim B Y, Blak J N, et al. Propagation and optical interaction of guided acoustic wave in two-mode opti-

(下转第66页)

- waves scattering by nonuniform plasma cylinder[J]. IEEE Proceedings: microwaves, antennas and propagation, 1997, 144(2): 61-66.
- [9] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185.
- [10] LI Tian-bao, XU Bing-she, LIANG Jian, et al. Progress in research of surface-plasmon-enhanced light-emitting diode[J]. Semiconductor Photonics and Technology, 2010, 16(2/3): 62-66.
- [11] GENG Zhao-xin, LI Qing, WANG Wei, et al. PMDS prism-glass optical coupling for surface plasmon resonance sensors based on MEMS technology[J]. Science China, 2010, 53(10): 2144-2158.

(上接第28页)

- cal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(3): 428-436.
- [9] Cao D Z, Dai E G. All-fiber Band-pass acousto-optic tunable filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 98-107.
- [10] Zhang Q, Zhu T, Shi L L, et al. All-fiber bandpass filter based on asymmetrical modes exciting and coupling[J]. Opt Commu, 2012, 286(1): 161-165.
- [11] Zhang H, Kang S X, Liu B, et al. All-fiber acousto-optic tunable bandpass filter based on a lateral offset fiber splicing structure[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-12.
- [12] Liu C, Pei L, Wang Y, et al. Temperature and axial strain characteristic of cladding etched single-mode fiber based acousto-optical filter[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 131-136.
- [13] Pei L, Liu C, Li J, et al. Highly sensitive axial strain fiber laser sensor based on all-fiber acousto-optic tunable filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(24): 2430-2433.
- [14] Liu C, Pei L, Wang Y, et al. Highly sensitive strain sensor based on cladding-etched all-fiber acousto-optic tunable filter[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2013, Beijing, 2013.
- [15] Tim A Birks, Philip St J, Russel, et al. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(11): 2519-2529.
- [16] Li Q, Liu X M, Peng J D, et al. Highly efficient acousto-optic tunable filter based on cladding etched single-mode fiber[J]. IEEE Photonic Tech L, 2002, 14(3): 337-339.

(上接第50页)

- [4] Wang X J, Chen Y X. Preparation and characterisation of Cd_{1-x}Zn_xS thin films grown in chemical bath deposition[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(s5): 208-211.
- [5] Yang Z X, Zhong W, Deng Y, et al. Design and synthesis of novel single-crystalline hierarchical CdS nanostructures generated by thermal evaporation processes[J]. Crystal Growth & Design, 2011, 11(6): 2172-2176.
- [6] 陈冰清, 常薇, 刘斌, 等. Cd_{1-x}Zn_xS的制备及光催化性能研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(9): 66-68+72.
- [7] 张效敏, 叶鸽. Cd_{1-x}Zn_xS纳米梳状结构的合成与光学特性研究[J]. 人工晶体学报, 2011, 40(2): 405-409.
- [8] Gunjal S D, Kholam Y B, Arote S A, et al. Structural, optical and electrical properties of spray pyrolysis deposited CdS films[J]. Macromolecular Symposia, 2015, 347(1): 9-15.
- [9] 陈星建, 丁浩冉, 徐波, 等. 气-固反应法制备纳米结构及其生长机制[J]. 中国粉体技术, 2010, 16(2): 8-11.
- [10] Sethi R, Kumar L, Sharma P K, et al. Tunable visible emission of Ag-doped CdZnS alloy quantum dots[J]. Nanoscale research letters, 2010, 5(1): 96.
- [11] Bakhsh A, Gul I H, Maqsood A, et al. Size dependent photoluminescence properties of CdZnS nanostructures[J]. Journal of Luminescence, 2016, 179: 574-580.
- [12] Gaur R, Jeevanandam P. Synthesis of Cd_{1-x}Zn_xS nanoparticles by a novel thermal decomposition approach and studies on their optical properties[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(9): 7223-7231.