

·学科进展·

光纤激光器的光纤光栅调谐方法

赵东晖 吕可诚 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

[摘要] 光纤调谐激光器在光通信领域中具有重要意义和应用前景。本文综合报道近几年来利用光纤光栅实现调谐的全光纤激光器的最新发展, 各种调谐方法的理论依据、实验装置和研究结果, 并对其未来发展作简要评述。

[关键词] 光纤调谐激光器, 光纤光栅, 调谐

复用光纤通信提供了加密光纤网络的方法, 宽波段可调谐激光器是这些系统中的关键部件, 有着重要意义和广泛的应用前景, 一直得到人们的广泛关注。近年来, 随着光纤通信、光纤传感和现场智能化光谱技术的迅猛发展, 迫切需要各种光学器件的集成化、微型化以及全光纤化, 在这种需求之下, 全光纤的可调谐激光器正以强劲的发展势头迎接 21 世纪的到来。

1 可调谐光纤激光器的作用及意义

随着所需的通信容量越来越大, 通信信息种类也越来越多, 特别是计算机通信、办公自动化以及视频通信等领域所需的通信容量增长更为迅猛, 光通信作为大容量的通信系统越来越受到人们的重视。然而, 目前已获得的最高传输容量远远低于光纤的潜在传输能力, 光纤的传输能力大部分还未被开发出来。因此, 人们一直致力于超高速大容量、长距离光纤通信系统的研究, 提出了许多提高容量的方法。研究表明, 光纤波分复用(WDM)通信是增加信道容量的一种有效的通信方式, 是当前光通信的发展方向^[1]。在这种新式通信系统中, 宽波段可调谐激光器是不可缺少的元器件, 是将该系统实用化的一个前提条件。人们在深入研究波分复用通信系统的同时, 对宽波段可调谐激光器的研究则越来越给以关注。

80 年代中期至今, 在光通信的实时应用和实验研究中, 人们使用的主要是半导体激光二极管, 因为它具有可连续调谐、小体积、高效率、高集成等特点, 而且有多种实现调谐的方法^[2]。然而各种调谐方法都存在着各自无法消除的弊端, 如: 热效应使波长稳定性变差, 导致模牵引等等。光纤激光器与激光二极管相比, 具有很多优点: 阈值相当低, 效率比较高; 掺杂到光纤中的掺杂物有许多种, 通常有铟、铈、镨、镱以及铒等, 因此它可获得多谱线的激光输出, 具有较宽的调谐范围; 在各种稀土类掺杂光纤激光器中, 掺铟光纤激光器尤其受到人们的重视, 因其波长 $\lambda = 1537 \text{ nm}$ 恰与光纤通信的第三窗口相匹配, 且与其他稀土

本文于 1997 年 6 月 20 日收到。

元素相比, 铒离子具有较窄的吸收和发射频带, 即使是在本地磁场可导致能级改变的硅玻璃中, 铒离子的跃迁谱线仍是很窄的; 光纤具有可缠绕性, 且电磁扰动对其影响很小, 具有很高的稳定性。基于上述种种优点, 可以说, 光纤激光器特别适用于长途光纤通信及多路通信系统, 是未来光通信的重要元器件。在其诸多优点中, 较宽的增益带宽尤其引人注目, 加之实现调谐的设计和制作工艺都比较简单, 所以近年来可调谐光纤激光器的研究得到十分迅速发展, 已逐渐成为激光器研制领域的一个热点。

2 利用光纤光栅实现调谐的方法

近年来国际上有关光纤调谐激光器常用的调谐方法有: 旋转光栅、调节腔内标准具的角度、利用声光滤波器、电调液晶标准具等等, 调谐范围通常能达到几十纳米。这些调谐方法都存在着一个无法消除的弊端: 非光纤的调谐器件与光纤的耦合效率通常很低, 增大了插入损耗, 导致激光器的低斜率效率和高阈值。

1978年, Hill等人首次观察到掺铒光纤中因光诱导产生光栅的效应。其后的十余年, 光纤光栅的写入技术日益成熟, 为各类全光纤器件的实现带来了福音, 也为低损耗全光纤调谐激光器的研究者们提供了新思路, 于是, 各式利用光纤光栅实现调谐的光纤激光器应运而生, 并取得了诸多新进展。

2.1 光纤光栅轴向拉伸应变调谐

利用光纤光栅实现调谐, 需要改变它的布喇格波长 λ_B , 由布喇格条件, 欲使 λ_B 发生改变, 必须改变光纤光栅的周期或折射率。基于这一理论, 美国研制者提出了一种机械控制光纤光栅应变来改变其周期和折射率从而实现调谐的方法。最初, 他们尝试对光纤光栅作机械拉伸, 发现在1550 nm附近, λ_B 随张应力的变化基本呈线性, 其变化量约为 $1.2 \text{ nm/mm}^{[3]}$ 。随后, 他们将此发现应用于短驻波腔的光纤激光器中, 得到了较好的结果。在这种光纤激光器的装置中, 由两个反射率为95%布喇格光纤光栅提供腔反馈(为保证二者的反射谱一致, 两光栅必须是相同的), 通过同时对两光栅和腔内作为增益介质的掺铒光纤进行均匀拉伸来完成波长调谐。在均匀拉伸的情况下, 激光器的腔长将增加, 光纤光栅也会伸长, 这两者对输出激光波长的影响是同步且一致的, 因而在调谐过程中不会发生跳模现象。然而光纤所允许的应变是受光纤弹性限制的, 它的杨氏模量为 $690 \times 10^6 \text{ Pa}$, 在性能退化或断裂之前所能承受的最大应力只有1%, 因此, 利用张应力产生的最大波长变化只有10 nm左右^[3], 而且光纤不能多次重复受力延伸, 否则必将影响激光器的寿命。

2.2 光纤光栅轴向压缩应变调谐

为缓解由光纤应力承受极限对调谐范围的限制, 人们改用轴向压缩法进行调谐, 得到了较为满意的效果。因玻璃光纤的受压能力比张应力强23倍, 可以大大展宽激光器的调谐范围。按此法设计的驻波腔可调谐激光器^[4], 在调谐过程中, 把自由光纤置于沿光纤轴精确对准的压力下是很难不发生皱折的, 因此需要把大部分光纤限制在浮动精密研磨的陶瓷套筒里, 剩余的光纤用环氧树脂粘合到陶瓷浮套之外的第二个套筒上, 一个套筒刚性固定, 另一个则固定在线性分辨率为 $\pm 50 \text{ nm}$ 的步进马达上, 由步进马达的增量运动来压缩光纤。

实验证明, 在光纤可承受的压力(约为22.2 N)范围内, 光波长随压力的变化是严格线性的, 各波长的输出功率浮动不大, 可从1557 nm调谐到1525 nm, 得到32 nm的调谐范

围,最大压缩幅度为2.7%;另外,利用自由光谱范围为25 GHz的F-P扫描干涉仪观测到,在整个调谐过程中没有跳模现象发生。据报道,利用这种方法调谐的光纤激光器的调谐范围最近已提高到约40 nm,已经接近掺铒光纤的增益带宽。

利用轴向压缩光纤光栅实现调谐的环形光纤激光器有两种不同的设计,一是利用三端口环形器将布喇格光纤光栅引入环路,二是利用 2×2 光纤耦合器将光栅引入环路^[5]。利用这两种方法分别得到18 nm和12 nm的调谐范围。

2.3 取样布喇格光纤光栅调谐

取样布喇格光栅(SBG)是一种按取样函数调制其振幅或相位的光栅。由耦合模理论可知它的反射谱特性:折射率扰动的每一个傅立叶分量,在反射谱表现为一个峰值,这样,它的反射谱就是有着相同间隔的多个反射峰谱。基于这一特性,研究者曾把它应用于分布式布喇格反射半导体激光器中,以展宽调谐范围。

前面提到,拉伸光纤光栅可改变选择波长,但由于光纤内部应力极限的限制,调谐范围较窄。若把两个具有不同反射峰间隔的SBG放置在环路中,同时完成波长选择,就可以大大缓解这一限制^[6]。对其中一个SBG进行拉伸,使它的反射谱发生移动,使得两个SBG的反射峰一个一个地逐次重叠,这样就完成了波长的不连续调谐。由于两个SBG的反射峰间隔的差异不是很大,实验表明,只需施加0.14%的张应力,就可得到16.7 nm的调谐范围。

2.4 光纤光栅垂直压力调谐

进行轴向应力调谐时,光纤光栅容易发生皱折,如果对其施加垂直压力实现调谐,在一定程度上可减少对光纤光栅的损伤^[7,8]。

为保证在调谐过程中光纤光栅不被折断,需在光纤光栅外包一层塑料保护套。为进一步提高光纤光栅的可弯曲度,可在保护套内加一细金属棒,然后用加热方法将光纤光栅固定在保护套内,套外有4个支点。实验表明,从两个互为相反的方向对光纤光栅施力时,波长分别向长波或短波方向移动,调谐范围分别为6 nm和2 nm。

另一种更为简捷的垂直应力调谐方法,是将光纤光栅的一端固定,另一端利用一个螺丝对光栅施力,也会得到较为满意的结果^[9]。

2.5 光纤光栅标准具应力调谐

在光纤激光器中,获得稳定的单频输出是一个难点。例如,当环形光纤激光器的腔长为6 m时,模间距为33 MHz,如果输出反射器是带宽为1 nm的光纤光栅(1 nm的带宽相当于125 GHz,远大于33 MHz),则多模的振荡是不可避免的。为解决这一问题,利用光纤光栅标准具是一种较为简单的方法^[9]。光纤光栅标准具是由两个完全相同的光纤光栅构成的,它们的反射率为95%,长为2 mm,两光栅中心间距为1 cm,自由光谱范围(FSR)是10 GHz,这样,振荡模式就减为10个左右。由于模竞争效应,当一种模式振荡时,其他模式就会由于均匀增益压缩而衰减直至熄灭,从而实现单模输出。当然,这种方法也会出现跳模现象。与上述其他方法一样,对整个标准具进行拉伸和压缩,可得到几个纳米的调谐范围,单模带宽可小于1.2 kHz。

2.6 宽波段连续调谐

近来我们提出一种新设想,即采用不同长度的掺铒光纤将其增益带宽分割成几个波段,每个波段分别调谐。选周期结构的布喇格光栅或啁啾-相移光栅作波长选择器,用拉伸和压

缩力或声表面波改变光纤光栅的有效周期和有效折射率的方法实现波长调谐。系统用一支大功率 980 nm 激光二极管泵浦, 通过环路中的几个方向的耦合器将几个波段的光分别引出, 构成多波长可调谐全光纤环形激光器。与目前用于通信系统中的半导体阵列调谐激光器相比, 这种新型激光器不需要附加制冷恒温系统, 输出稳定, 且因光纤的可柔绕性, 器件可得十分小巧, 并有高性能价格比。因此, 这种激光器特别适用于波分复用、频分复用以及时分复用通信系统, 也是分布式光纤传感器及许多新颖轻便的实时检测系统的理想光源。

3 光纤光栅调谐激光器的未来发展

全光纤调谐激光器的研究起步伊始, 有许多问题尚待深入探讨, 预计未来的研究工作有以下几个方面:

(1) 光纤光栅性能的提高和新型光纤光栅调谐的探索。全光纤调谐激光器的波长选择由光纤光栅完成。显然, 全光纤调谐激光器的完善和发展在很大程度上将依赖于光纤光栅技术的发展, 诸如光纤光栅工作波长的选取、波长的稳定性、峰值波长的带宽和反射率、使用寿命和费效比等都是迫切需要解决的主要问题。另外, 目前利用光纤光栅实现调谐的研究都集中在均匀周期光纤光栅上, 利用啁啾-相移光纤光栅或其他类型的光纤光栅作调谐元件将是研究工作的一个主要方向。

(2) 增大全光纤调谐激光器的调谐范围的研究。许多科学技术和实际应用领域都需要更宽调谐范围的全光纤调谐激光器。研究者们致力探讨最大限度地利用掺铒光纤的增益带宽, 增大激光器的可调谐范围, 得到了可喜的研究结果, 但尚待进一步完善和提高。另外, 有多种稀土元素可以掺杂到光纤中形成增益介质, 获得多种谱线的光放大。预期, 寻找更大增益带宽的掺杂光纤将是一个可能的研究方向。

一些研究表明, 用较大功率的全光纤锁模激光器产生超短脉冲通过低色散光纤可以产生超连续谱, 谱宽可达 200 nm。未来的工作应探讨利用这种超连续谱特性实现激光调谐输出的可能性。

(3) 全光纤调谐激光器稳定性的提高将是未来理论研究和实验研究的一大重点。无论是驻波型还是行波型可调谐激光器, 激光振荡的模式和自脉动等现象严重影响激光输出稳定性(包括波长稳定性和功率稳定性), 这涉及到激活介质的特性和模式竞争等问题, 理论问题比较复杂, 技术问题也有一定难度。未来的研究工作应该搞清全光纤调谐激光器输出稳定性的物理机制, 并寻求相应的技术措施。

(4) 全面提高全光纤调谐激光器的性能, 尽快达到实用化和产品化。目前, 全光纤调谐激光器的研究尚处于实验室研究阶段, 极少有商品提供。今后应努力提高激光器的泵浦效率和输出功率, 增加激光输出的稳定性, 延长寿命, 优化设计, 降低成本, 使之达到实用化水平, 尽快形成产业。

参 考 文 献

- [1] 张煦. 多路载波光通信. 光通信技术, 1992, 16 (2): 79—85.
- [2] 梅遂生. 迎接 21 世纪的固体激光技术. 激光与光电子学进展, 1995, 30 (4): 4—6.

- [3] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Soci. Ameri.*, 1992, **17** (6): 420-421.
- [4] Ball G A, Morey W W. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser. *Opt. Soci. Ameri.*, 1994, **19** (23): 1979-1980.
- [5] Pan J J, Yuan Shi. Tunable Er^{3+} -doped fiber grating incorporated by optical circulator or fiber coupler. *Electron. lett.*, 1995, **31** (14): 1164-1165.
- [6] Ibsen M, Eggleton B J, Sceats M G et al. Broadly tunable DBR fiber laser using sampled fiber Bragg gratings. *Electron. lett.*, 1995, **31** (1): 37-38.
- [7] Komukai T, Miyajima Y, Nakazawa M. In-line fiber grating-type optical bandpass filter tuned by applying lateral stress. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34** (3A): 306-307.
- [8] Komukai T, Miyajima Y, Nakazawa M. An in-line optical bandpass filter with fiber gratings and an optical circulator and its application to pulse compression. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34** (2B): 230-231.
- [9] Komukai T, Nakazawa M. Tunable single frequency erbium doped fiber ring lasers using fiber grating etalons. *Jpn. Appl. Phys.*, 1995, **34** (6A): 679-680.

SURVEY OF ALL-FIBRE TUNABLE LASER WITH FIBRE GRATING

Zhao Donghui Lu Kecheng Dong Xiaoyi

(*Modern Optics Institute of Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract This paper discusses the importance and value of all-fibre tunable laser in optical communication. The development trends of utilizing fibre grating to realize all-fibre tunable laser is introduced, and the theoretical background, experimental arrangement and research results of each tuning way are also reported. The paper ends with a brief discussion on the future development of the all-fibre tunable laser.

Key words all-fibre tunable laser, fibre grating, tuning

·资料·信息·

国家自然科学基金委员会代表团访问埃及 与埃及科学技术院签署科学合作协议

应埃及科学技术院邀请,国家自然科学基金委员会副主任孙枢院士率团于1998年3月9—18日访问埃及共和国。这是国家自然科学基金委员会代表团第一次出访非洲,此次访问受到埃及有关方面的友好接待,并得到我国驻埃及大使馆的大力支持。

访问期间,双方就开展双边合作达成一致意见,拟在电子、海洋、环境、天文和地球物理、新材料、农业等领域进行合作与交流。当地时间3月14日,孙枢副主任与埃及科学技术院莫塞(Moursy)副主席签署了科学合作协议。代表团还访问了埃及国家研究中心、冶金研究与发展研究所、天文和地球物理研究所、石油研究所、穆巴拉克科学城、开罗大学、希尔文(Helwon)大学等。所到之处埃方都表示了与我合作的强烈愿望。

(国际合作局白 鹤供稿)