

文章编号: 0258-7025(2003)04-0325-04

可实现连续激光-脉冲转换的全光纤 声光耦合环形谐振腔

程凯, 李佟, 金■, 彭江得

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 研究了光纤声光耦合环形腔独特的谐振特性。结果表明利用光纤声光耦合器的移频与滤波特性, 可研制成一种全新结构的光纤声光耦合环形谐振腔。从理论和实验上证明了: 基于腔内累积声光移频分量的多光束干涉, 光纤声光耦合环形谐振腔可将注入的连续激光转换为脉冲列输出。

关键词 光电子学; 光纤环形谐振腔; 声光效应; 光纤零耦合器

中图分类号 TN 815 **文献标识码** A

All-fiber Acousto-optic Coupled Ring Resonator with the Function to Convert Continuous Laser Light to Pulse Train

CHENG Kai, LI Tong, JIN Tao, PENG Jiang-de

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The characteristics of fiber acousto-optic coupled ring resonators were studied. It is found that a novel acousto-optic coupled ring resonator can be got for the frequency-shift and filtering characteristics of the acousto-optic fiber coupler. Theory and experiments have demonstrated that such a resonator has a unique feature that it can convert continuous laser to pulse train caused by the interference of multiple-beams with accumulative shift-frequencies in the fiber loop.

Key words optoelectronics; fiber ring resonator; acousto-optic effect; fiber null coupler

1 引言

1982年, L. F. Stokes等首次研制成光纤耦合环形谐振腔^[1], 这种基于同频多光束干涉原理的光纤环形腔具有结构简单、精细度高、使用灵活的特点, 已广泛用于高灵敏相位型光纤传感器、高分辨率频谱分析仪、可调谐光纤激光器及光纤陀螺等技术领域。

作者基于光纤声光耦合器的声光移频和滤波特性而提出一种全光纤声光耦合环形腔的新构思。利用环形腔内累积声光移频分量的多光束干涉, 这种光纤声光耦合环形腔具有将连续激光转换为序列脉冲输出的独特功能, 可望在光纤无模激光器、主动调Q激光器以及光纤陀螺等技术领域获得重要应用。

2 理论分析

光纤声光耦合环形腔由一个光纤声光耦合器取代常规光纤环形腔中的对称光纤耦合器构成, 如图1所示。图中的光纤声光耦合器由一个光纤零耦合器加载声波构成。在不加载声波的情况下, 输入光将从直通路输出; 在腰区加载声波后, 由于光纤中的声光效应, 腰区中的基模 LP_{01} 模将与 LP_{11} 模互相耦合, 输入的基模光将转换成移频基模光而从交叉路输出。基模和次高阶模之间的耦合需要满足布拉格条件^[2], 即

$$L_B = \Lambda \quad (1)$$

L_B 为发生耦合的两个模式的拍长, Λ 为声波波长。若将该光纤声光耦合环形腔看成一个四端口的器件, 则其传递函数受到加载声波的控制, 其功能可描

收稿日期: 2002-02-05; 收到修改稿日期: 2002-12-09

作者简介: 程凯(1977—), 男, 安徽阜阳人, 主要从事光电子学的研究。E-mail: chengkai99@mails.tsinghua.edu.cn

述为:移频、滤波和相移^[3]。

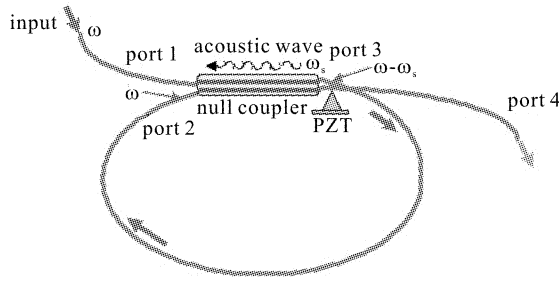


图 1 光纤声光耦合环形谐振腔结构示意图

Fig. 1 Configuration of all-fiber acousto-optic coupled ring resonator

综上所述,光纤声光耦合器具有普通对称光纤耦合器所不具备的独特性质,虽然用它构建的光纤环形腔的结构与普通光纤环形腔类似,但其谐振特性与普通光纤环形腔截然不同。

参见图 1,在不加声波时,耦合器不起作用,从 1 口输入频率为 ω 的光波先后经过 3 口和 2 口从 4 口输出,光波频率 ω 保持不变;如在耦合器上加频率为 ω_s 的声波,则当频率为 ω 的光波从 1 口输入时,满足声光布拉格条件的一部分光波将耦合到 4 口输出,并产生移频($\omega + \omega_s$),另一部分没有耦合的光依然从 3 口环行到 2 口,频率仍为 ω ;2 口的这一部分光又将分为两部分,一部分直通到 4 口输出,光频 ω 保持不变;而另一部分又经声光作用而耦合到 3 口,并

产生移频($\omega + \omega_s$),……。如此周而复始,在光纤环形腔内就会形成累积移频光($\omega, \omega + \omega_s, \omega + 2\omega_s, \dots$)的多光束干涉。

由傅里叶分析可知,频域上的脉冲序列也是时域上的脉冲序列。为简单起见,这里只考虑声光耦合器的移频作用和插入损耗(设光纤声光耦合器的插入损耗为 δ_0),并考虑光纤腔中的相位延迟和损耗。假设从 1 口输入的单色光场为 $E_1(t) = E_{10} e^{j\omega t}$,直通到 3 口的初始光场为 $E_0(t) = E_{10} e^{j\omega t} \delta_0 \sqrt{1 - \kappa}$,光在腔中传播一周的相移为 φ ,则环形腔内光场强度可写成

$$E_{in}(t) = E_0(t) \sum_{n=0}^{+\infty} \delta^n \cdot e^{jn\omega_s t} \cdot e^{in\varphi} \quad (2)$$

$$\delta = \sqrt{\kappa} \cdot e^{-\alpha L} \cdot \delta_0 \quad (3)$$

式中 κ 为光纤声光耦合器的功率耦合比, $e^{-\alpha L}$ 为光纤环的传输损耗,则 δ 代表光波环行一周的总损耗,由 (2) 式可得到

$$E_{in}(t) = E_{10} e^{j\omega t} \delta_0 \sqrt{1 - \kappa} \frac{1}{1 - \delta e^{j(\omega_s t + \varphi)}} \quad (4)$$

则 3 口处环形腔内的光场强度为

$$I_{in}(t) \propto |E_{in}(t)|^2 = \frac{|E_{10}|^2 \delta_0^2 (1 - \kappa)}{1 + \delta^2 - 2\delta \cos(\omega_s t + \varphi)} \quad (5)$$

作为例子,设 $\kappa = 0.81$, $\omega_s = \frac{\pi}{2} \cdot 10^6$ rad/s, $\delta_0 = 1$, $e^{-\alpha L} = 1$,理论计算得到腔内光强波形如图 2(a)所示。

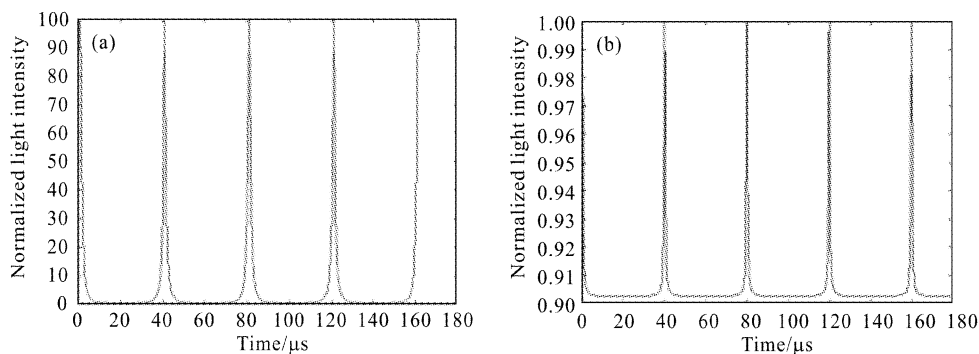


图 2 光纤声光耦合环形腔的谐振特性

(a) 腔内光强; (b) 输出光强

Fig. 2 Resonant characteristics of all-fiber acousto-optic coupling ring resonator

(a) light intensity in the resonator; (b) output light intensity

端口 4 的输出光场强度为

$$E_{out}(t) = \delta_0 \sqrt{\kappa} \cdot E_1(t) + E_{in}(t) \delta_0 \sqrt{1 - \kappa} = E_{10} e^{j\omega t} \delta_0 \left[\sqrt{\kappa} + (1 - \kappa) \frac{\delta_0}{1 - \delta e^{j(\omega_s t + \varphi)}} \right] \quad (6)$$

(6)式由两部分构成,方程右边的第一项就是直接耦合输出的输入光,第二项是耦合输出的腔内谐振光。由 (6)式得到端口 4 的输出光强为

$$I_{\text{out}}(t) \propto |E_{\text{out}}(t)|^2 = |E_{10}|^2 \delta_0^2 \left\{ \kappa + \frac{2\sqrt{\kappa}(1-\kappa)(\cos\phi - \delta\cos\omega_s t) + 1}{1 + \delta^2 - 2\delta\cos(\omega_s t + \phi)} + \frac{\kappa(\kappa - 2)(\cos\phi - \delta\cos\omega_s t)^2}{[1 + \delta^2 - 2\delta\cos(\omega_s t + \phi)]^2} \right\} \quad (7)$$

设 $\kappa = 0.81$, 由(7)式得到输出光强波形如图 2(b) 所示。

由上述分析可见, 由于光纤声光耦合环形腔内累积移频光多光束干涉的结果, 注入的连续激光会形成时序上的光脉冲列输出。从(7)式得到输出脉冲列的重复频率为

$$\nu_{\text{repeat}} = \omega_s / 2\pi \quad (8)$$

脉冲宽度为

$$\tau = \frac{2(1-\delta)}{\omega_s \sqrt{\delta}} = \frac{1-\delta}{\pi \sqrt{\delta}} \cdot \frac{1}{\nu_{\text{repeat}}} \quad (9)$$

由上述分析可见, 光纤声光耦合环形腔具有将连续激光转换为序列脉冲输出的独特功能; 其脉冲重复频率 ν_{repeat} 等于声波频率, 与光纤环形腔腔长无关; 其脉冲宽度 τ 由光纤声光耦合器的光功率耦合比及环形腔损耗决定, 提高声光功率耦合比并降低腔的损耗, 则脉冲宽度 τ 将随之压窄。

3 实验结果

实现全光纤声光耦合环形腔的关键是制作低损耗、高分光比的光纤零耦合器。其技术要点是^[4]: 将构成耦合器的两根单模光纤中的一根预先拉细(直径约为原直径的 0.75~0.8), 使两者的传播常数失配; 由于声致折射率变化是各向异性的, 为利于控制加载声波的振动方向, 应使耦合器腰区(声光作用区)内两光纤尽可能平行; 因零耦合器最大分光比及偏振相关性与两纤芯接近的程度有关, 应适当控制熔烧度, 以获得最佳的腰区截面形状; 为获得较长的均匀腰区而实现有效的声光作用, 采用移动火头以增大均匀加热区。实验中严格控制工艺过程, 制作出腰区直径 6~13 μm , 均匀腰区长度 8~10 mm 的光纤零耦合器, 插入损耗 < 0.02 dB, 最大分光比 45~50 dB^[5]。

采用直径 1 cm 的压电陶瓷圆片作超声换能器, 将其紧贴于一个小铝锥底部, 再将铝锥尖胶粘在光纤零耦合器的过渡锥区, 使纤细的均匀腰区不致引入附加损耗, 并有效地将声波作用于腰区。为获得高效的声光耦合, 应使声波振动方向与融合的两光纤的长轴方向一致。如前所述, 腰区两最低阶模式的拍长与光波长有关, 所以在某一声波频率下只有

某一波长范围内的光可以发生模式转换。实验中加载的声波频率为 1.585 MHz, 采用宽带 LED 作光源, 图 3 给出测得的声光滤波谱, 直通路与交叉路的输出光谱是互补的。理想的声光滤波谱应该是一个 sinc^2 函数, 图中主峰位于 1500 nm 波长处, 中心波长附近的次峰对应的是第一旁瓣, 而 1535 nm 附近的小峰以及主峰两侧的不完全对称是腰区微小的不均匀性引起的。

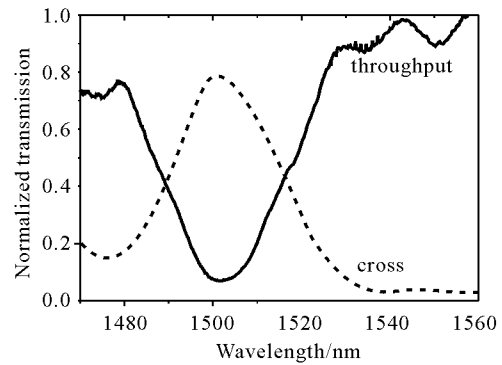


图 3 光纤声光耦合器的滤波特性

Fig. 3 Filter spectrum of the fiber acousto-optic coupler

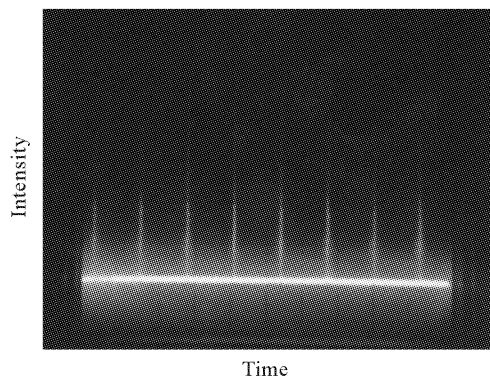


图 4 实验观测到的脉冲输出波形 ($\kappa = 60\%$)
(横轴为时间, 纵轴为光强)

Fig. 4 Experimentally measured output pulse train
($\kappa = 60\%$)

为实验验证全光纤声光耦合环形腔的光脉冲转换特性, 先将波长为 1550 nm 的激光注入上述光纤声光耦合器, 谱线宽度为 20 MHz。调节加载声波的频率, 在声波频率为 600 kHz 时, 测得声光耦合效率达到 60%; 然后, 将耦合器交叉臂相连成环, 腔长为 1.5 m, 在示波器上看到光纤声光耦合环形腔

清晰的脉冲输出波形,如图 4(a)所示。测得的脉冲重复频率与声波频率一致,脉冲的周期约为 $1.7 \mu\text{s}$;脉冲宽度为 $0.1 \mu\text{s}$ 。根据(9)式,忽略耦合器的插入损耗和腔内传输损耗,理论计算的脉冲宽度为 $0.14 \mu\text{s}$,可见实验结果与理论计算非常吻合。

4 结 论

理论和实验证明,由于光纤声光耦合环形腔中累积移频分量的多光束干涉,这种新型光纤环形腔具有将注入的连续激光转换为脉冲列输出的独特功能。通过提高光纤声光耦合器的声光耦合比和减小环形腔损耗,可进一步压窄脉冲宽度。这种全光纤声光耦合环形腔可望在光纤无模激光器、主动调 Q 激光器以及新型光纤陀螺等技术领域获得重要应用。

参 考 文 献

- 1 L. F. Stokes, M. Chodorow, S. Herbert. Sensitive all single mode fiber resonant ring interferometer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1983, **LT-1**(1):110~115
- 2 T. A. Birks, P. St. J. Russell, D. O. Culverhouse. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(11): 2519~2529
- 3 B. Y. Kim, J. N. Blake, H. E. Engan *et al.*. All-fiber acousto-optic frequency shifter [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(6):389~391
- 4 Li Tong, Li Qun, Liu Dan *et al.*. The experimental study on wide-band tunable all-fiber acousto-optic filter based on null coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(5):423~428
- 5 Li Tong, Peng Jiangde, Li Qun *et al.*. Null coupler with ultra-high splitting ratio of 100000 : 1 for all-fiber acousto-optic switch [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(6):519~524

双包层光纤激光实现 20 W 激光输出*

高功率双包层光纤激光器是国际上新近发展的一种新型固体激光器件,它具有散热面积大、光束质量好、体积小等优点,同常规的体积庞大的气体激光器和固体激光器相比,均占有明显的优势,已逐渐发展成为高精度激光加工、激光雷达系统、空间技术、激光医学等领域中的重要候选者。

最近,我们在原 4.9 W 双包层光纤激光器研究的基础上,通过研究抽运源半导体激光器(LD)的光谱特性对光纤激光输出特性的影响,改用中心波长约在 975 nm 的 LD 替代原 915 nm 的 LD。通过不同抽运输出对耦合吸收效率影响的研究,改用准直输出的功率 LD 替代光纤耦合输出的 LD,并重新设计了较大孔径的光学耦合透镜组,获得了 20.6 W 的光纤激光功率输出。

所用抽运源为准直输出的大功率 LD 模块,其输出约为 $11\text{mm} \times 11\text{mm}$ 的方形准直光束,中心波长约在 970 nm 处。双包层光纤为矩形内包层的掺 Yb^{3+} 石英光纤,内包层数值孔径为 0.47,掺 Yb^{3+} 纤芯直径约 $9 \mu\text{m}$,数值孔径约为 0.1。采用直接端面抽运的方式抽运双包层光纤,通过特殊设计的光学耦合透镜组,将接近准直输出的抽运光聚焦小于光

纤内包层的光斑,直接耦合入双包层光纤。光纤的抽运端面有一双色片(对 975 nm 附近高透;对 $1.08 \mu\text{m}$ 附近高反)作为前腔镜。

采用上述的实验装置,在半导体激光器驱动电流为 6.3A 时观察到光纤激光器有激光输出,增大驱动电流,激光输出功率随之增大,当电流为 42 A 时,得到了 20.6 W 的激光输出,光-光转换效率约为 55%。采用光谱分析仪测量了光纤激光的输出光谱特性,中心波长在 1111 nm,光谱带宽为 1.8 nm。采用光束质量分析仪,测得输出激光为接近衍射极限的基横模,光束质量因子 M^2 小于 1.1。

这种 20 W 双包层光纤激光器结构紧凑,使用灵活方便,可望在光纤通讯、激光雕刻、激光打标以及激光检测和测量等领域获得广泛应用。

中国科学院上海光学精密机械研究所,
上海 201800
楼祺洪,周 军,朱健强,朱晓峥,董景星,
孔令峰,叶震寰,魏运荣,王之江
收稿日期:2003-02-02

* 国家自然科学基金(编号:60244005)、中国科学院知识创新工程和上海市科委光科技专项(编号:012261002)资助项目。