

基于高Q值氮化硅微环反射镜的窄线宽单模光纤激光器

Narrow Linewidth Single Frequency Fiber Laser Based on High-Q Silicon Nitride Microring Reflector

章元珏/ZHANG Yuanjue

李渔/LI Yu

陈明华/CHEN Minghua

(清华大学, 北京 100084)

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0034-004

摘要: 实现了一种基于片上高Q值氮化硅(Si₃N₄)微环反射镜的单模光纤激光器。利用微环反射镜的窄线宽特性,可以在使用较长增益光纤的同时保证激光的单模激励。由于激光谐振腔的加长,可以得到更好的线宽特性。实验中,采用长度为12 cm的掺铒光纤作为增益介质。通过在掺铒光纤的两端分别使用布拉格光栅(FBG)和微环反射镜,构建了一个基于法布里-珀罗(FP)谐振效应的光纤激光器,微环反射镜的Q值达到 2.5×10^5 。获得了线宽为8 kHz的单频激光输出。

关键词: 光纤激光器;集成光器件;微环;窄线宽

Abstract: A single frequency erbium-doped fiber laser with an on-chip high-Q silicon nitride (Si₃N₄) micro-ring reflector is demonstrated in this paper. As a result of the narrow bandwidth of the micro ring cavity, longer gain media can be employed and single-frequency lasing can still be realized, which is also beneficial for better linewidth performance. In our demonstration, the compact laser cavity is composed of an on-chip micro ring with a Q value of up to 2.5×10^5 , a 12 centimeters erbium doped fiber and a fiber Bragg grating (FBG). The linewidth of the laser output is about 8 kHz.

Keywords: fiber laser; integrated optics devices; micro ring; narrow linewidth

Ball等人制作了第一台基于布拉格反射镜构建的1550 nm单模光纤激光器^[1]。数年后,又发展出分布式布拉格反射镜(DBR)的激光器结构。由于这种结构简单、紧凑并且具有很高的鲁棒性,因此近年来基于DBR结构的单模光纤激光器广受青睐^[2]。具有窄线宽的单模激光器在各个领域中都有广泛应用,如相干光通信、激光雷达(LIDAR)和最近的引力波探测等。

在使用布拉格光纤光栅(FBG)构建光纤激光器的研究中,已经实现了千赫兹的窄线宽输出^[3],在文献[4]的研究中,其线宽甚至达到百赫兹量级。但是,由于FBG的带宽通常大于0.1 nm,这就要求激光谐振腔必须足够短(即纵模间隔足够大)来避免产生多纵模,通常此类激光器的腔长在2 cm以下。为了保证激光腔有足够的增益以提高输出光功率,必须使用

具有很高掺杂浓度的增益光纤,此类光纤通常很难获得。在文章中,我们使用硅基微环反射镜来代替窄带FBG,其中微环反射镜的Q值达 2.5×10^5 ,带宽仅为800 MHz。使用高Q值微环作为反射镜的激光器,在单纵模工作时可以配置更长的增益光纤。文章中我们提出的激光器使用的掺铒光纤的长度为12 cm,比使用FBG的激光器高出了6倍。根据Schawlow-Townes^[5]的相关公式,较长的谐振腔可以进一步改善线宽特性。最终,我们成功地利用片上微环反射镜和FBG构建了一个单模窄线宽激

光器。

1 基于微环的单模窄线宽激光器原理和设计

1.1 高Q值微环反射镜

TriPleX™ 氮化硅波导技术是目前主流的与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的集成光子平台。它具有损耗低,结构紧凑的优势。因此,我们可以采用这种技术实现具备高Q值、高反射率特性的硅基片上微环反射镜。TriPleX™ 波导技术的3类典型结构之一的双条形波导结构如

收稿日期: 2017-08-05
网络出版日期: 2017-09-04

图1a)所示。该波导在水平方向上的宽度为 $1.2\ \mu\text{m}$ ，垂直方向上由3层薄膜构成，各层依次为：氮化硅层、二氧化硅层和氮化硅层，这3层薄膜的厚度分别为： $170\ \text{nm}$ 、 $500\ \text{nm}$ 和 $170\ \text{nm}$ 。该波导的传输损耗低至 $0.1\ \text{dB/cm}$ ，弯曲损耗在波导弯曲半径超过 $70\ \mu\text{m}$ 时就可以忽略不计。图1b)显示了该波导所支持的横电波模式(TE₀)的电场分布图，这个模式在真空波长为 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长处的有效折射率为 1.535 ，群折射率为 1.715 。此外，针对TriPlex™波导平台的光纤耦合器，对TE₀模式进行了专门设计，使其不支持横磁波模式(TM₀)的传输，具有高达 $20\ \text{dB}$ 的偏振抑制比。

为了实现窄线宽的单模激光器，在设计微环反射镜时，主要应考虑以下3方面的特性：自由谱区(FSR)、反射率和Q值。首先，为了保证单模激光的产生，微环的FSR必须大于FBG的带宽。通常，光纤光栅的反射带小于 $1\ \text{nm}$ ，我们可以通过式(1)计算出微环反射镜的半径：

$$FSR = \lambda^2 / (2\pi R n_g) \quad (1)$$

其中， λ 为中心波长， R 为微环半径， n_g 为波导的群折射率。当FSR的值为 $1\ \text{nm}$ ， λ 为 $1\ 550\ \text{nm}$ ， n_g 为 1.715 时，通过计算可以得知，微环的半径必须小于 $233\ \mu\text{m}$ 。另一方面，半径越小的微环反射镜所实现的整体器件尺寸也就更小。因此，在满足弯曲损耗可以忽略的条件下应尽可能地减小微环的半径。最终，我们选择 $125\ \mu\text{m}$ 这样一个典型值作为微环反射镜的半径。由公式(1)计算可得，此时微环反射镜的FSR约为 $2\ \text{nm}$ 。

微环反射镜的Q值与激光器的腔长相关，构建光纤激光器时，在满足激光器的单模工作条件下，Q值越大，可以选用的增益介质更长。在其他参数不变的情况下，微环的Q值与总线波导和微环间的功率耦合系数 k 成反比。为了获得较大的Q值，应该采用较小的 k 值。但 k 值同时也决定

着微环反射镜的反射率， k 值越小，反射率越低。图2a)中显示了功率耦合系数 k 值与Q值和反射率的关系。考虑到Q值最终决定了激光器谐振腔的腔长，反射率必须足够高以避免腔内损耗太大，我们需要选取一个合适的 k 值。光纤和芯片之间的耦合损耗估计约为 $3\ \text{dB}$ ，即光往返一周损失 $6\ \text{dB}$ 。除此之外，其他的损耗还包括FBG透射，单模光纤与掺铒光纤间的耦合损耗等。在具体设计时，我们用额外的 $3\ \text{dB}$ 来囊括这些损耗。由于候选的掺杂光纤增益系数为 $1\ \text{dB/cm}$ ，所以光纤的长度至少要有 $9\ \text{cm}$ ，相对的Q值必须足够大，否则激光将无法单模工作。

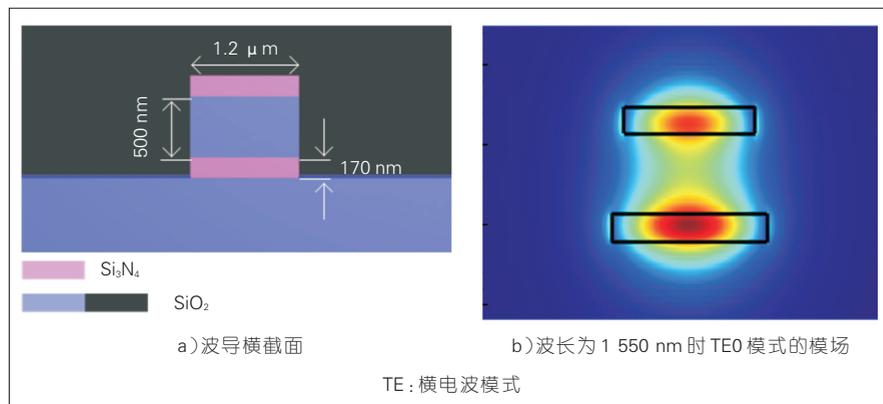
综合以上的情况考虑，我们选取 k 值为 0.008 ，相应的反射率不小于 $-1\ \text{dB}$ ，Q值约为 3×10^5 。与 k 值相关联的微环物理参数为总线波导和微环之间的间隔，它们的关系具体如图2b)中所示，当 k 为 0.008 时，间隔大约

为 $1\ 240\ \text{nm}$ 。

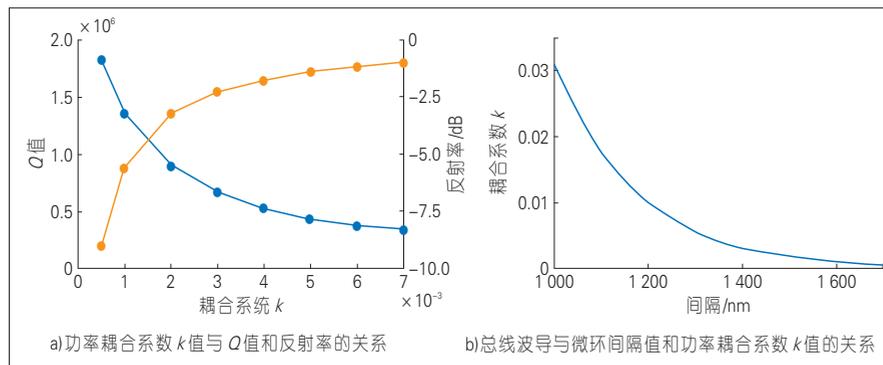
1.2 单模和窄线宽

在我们的激光器结构中，一端为传统的光纤光栅反射单元，另一端为高Q微环反射镜，因此它的谐振腔可以看成由2个腔级联而成：一个是由芯片反射单元和光纤光栅构成的法布里-珀罗(FP)腔，其腔损包含了光纤与芯片间的耦合损耗；另一个则是前文讨论的高Q微环腔。当激光谐振腔长为 $13\ \text{cm}$ 时(铒与光纤光栅的长度之和)，我们可以得到整体谐振腔的透射率谱如图3所示。图中显示，叠加带宽为 $800\ \text{MHz}$ 的高Q微腔滤波器后，其最近边模可被抑制 $3\ \text{dB}$ 以上。当激光激励时，腔内存在的模式竞争将进一步抑制边模振荡。因此，我们可以判断图3情况下的激光腔将能产生单模的激光输出。

根据Melvin Lax^[6]提出的修正的Schawlow-Townes公式，在只考虑量子



▲图1 TriPlex™波导平台的双波导结构



▲图2 微环设计相关参数

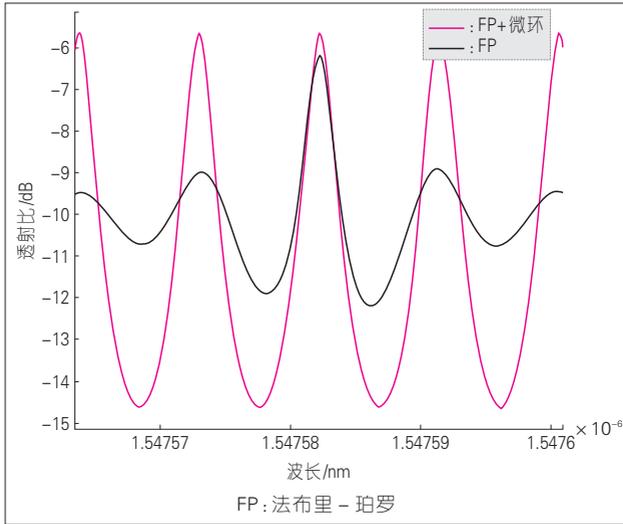


图3 在腔长为13 cm时法布里-珀罗腔和级联腔的透射谱

噪声的条件下,激光器的线宽可以通过式(2)计算:

$$\Delta v_{laser} = \pi h\nu (\Delta v_c)^2 / P_{out} \quad (2)$$

其中, $h\nu$ 为光子能量, Δv_{laser} 和 Δv_c 分别为激光器和冷腔的半高全宽线宽, P_{out} 为腔内的光功率。冷腔线宽 Δv_c 的计算如式(3):

$$\Delta v_c = v_0 / Q_c = \beta c / 2\pi n L \quad (3)$$

其中, β 为单程损耗, n 为增益介质的折射率, L 为线性腔腔长。由于光纤激光器腔长远大于半导体激光器,所以具有更好的线宽特性。通常来说,光纤激光器的线宽在千赫兹量级,而半导体激光器为兆赫兹量级。为了满足单模激射条件,光纤激光器的腔长通常被限制得很短。从上面计算激光线宽的式子可以看出,与激光器的输出功率相比,激光器的腔长对激光器线宽的影响更大。FBG的带宽通常大于0.1 nm,而微环反射镜可以取得更小的带宽。尽管芯片和光纤的耦合会带来较大的损耗,但通过合理的设计,窄线宽带来的优势可以弥补损耗增大带来的负面影响并进一步减小线宽。

当然,噪声的引入同样会恶化激光器的线宽特性,此类噪声包括:泵浦功率起伏,晶体温度起伏等,一个紧凑的激光器结构将会减轻这些噪

声的影响。

2 激光器实验设置和结果

将微环反射镜与普通单模光纤耦合后,在一端测量其反射谱,结果如图4所示。测量得到的微环参数与设计时存在一些差别,这是因为工

艺上的误差造成的。从放大图可以看出微环反射镜的 Q 值为 2.5×10^5 。腔内的激光从一端的FBG处透射输出,FBG的反射率为90%。FBG的反射率同时影响激光腔的损耗和从激光腔内输出的光功率大小,因此可通过对FBG反射率进行优化进一步提高激光器性能。

光纤激光器的结构如图5所示。与传统的DBR结构不同,我们用微环反射镜替代一端的FBG。由于微环反射镜的窄线宽特性,允许我们使用较长的增益介质。在实验中,我们选用了12 cm长的LIEKKITM Er110-4/125掺铒光纤,该光纤在1530 nm处的峰值核心吸收系数为110 dB/m,数值孔径为0.2,在1550 nm处的模场直径为6.5 μm 。为了构建线性谐振腔,将一个FBG熔接在EDF的一端,EDF的另一端与芯片反射镜耦合。微环与光纤之间的耦合损耗大约为4 dB,往返将有8 dB的损耗,这是激

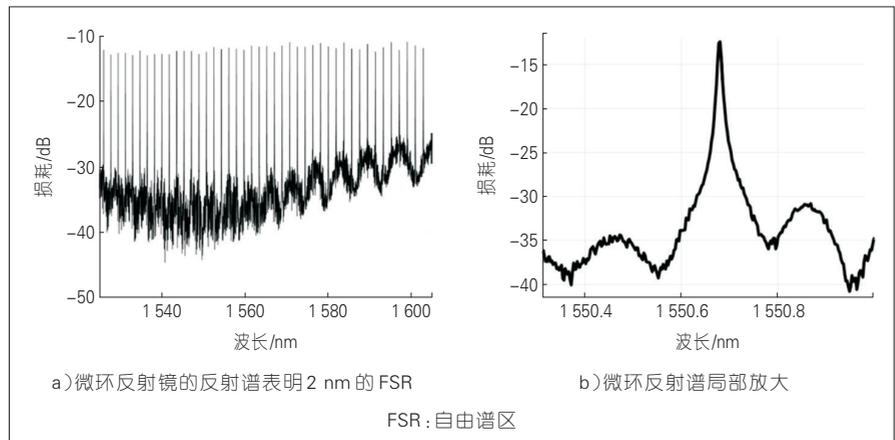


图4 微环的反射特性

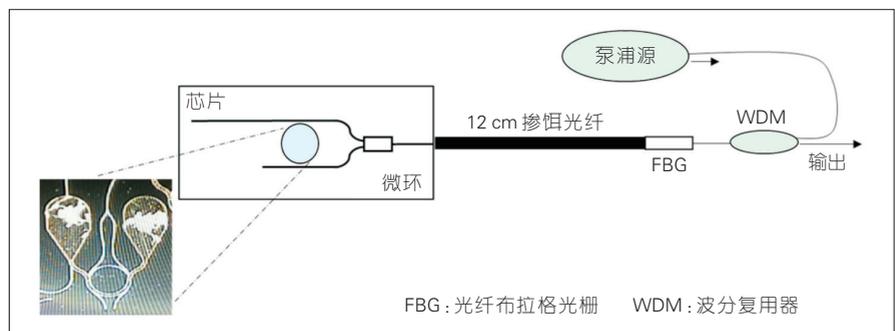


图5 光纤激光器结构

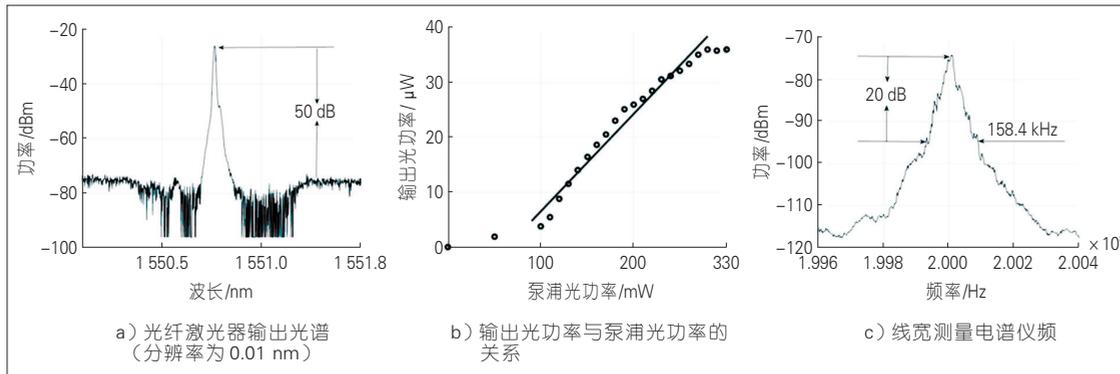


图6
激光器实验结果

光腔的主要损耗。微环反射镜的FSR为2 nm,大于FBG的带宽。为了保证激射,我们可以在芯片上的电极上外接电流源,调节反射镜的反射峰,从而使得反射峰落在FBG的反射带内。

激光器实验结果如图6所示。最终,我们获得了35 μW功率的1550 nm激光输出,信噪比大于50 dB。该激光器的泵浦阈值功率为100 mW,当泵浦功率达到280 mW时,激光器渐趋饱和。由于线性腔的损耗较大,加之增益介质提供的增益不足,导致最后的输出功率比较低。我们使用自差拍方法来测量激光线宽。输出激光通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,经由一个带通滤波器过滤带外噪声,然后分为两束。其中一束经由声光移频器移频200 MHz,另一束则经过5 km光纤的延迟。之后,将两束光拍频的结果输入电频谱仪中分析。为了推断线宽的数值,我们考察峰值以下20 dB处的线宽。从电频谱中观察到20 dB处的线宽为158.4 kHz,在假设激光器线宽满足洛伦兹线型前提下,相应的3 dB线宽为8 kHz。

3 结束语

我们成功实现了高Q值微环反

射镜,并基于微环反射镜构建了一个窄线宽光纤激光器,得到了8 kHz的激光输出。采用更高增益的增益介质,并减少耦合损耗,可以有效提高激光器的输出和线宽性能。由于微环还具有可调谐的特性,因此可以尝试构建可调谐激光器。随着硅光子学的进一步发展,片上的光系统将会有更多的功能和应用。如果将光纤激光器的输出端设计在芯片上,该激光器可以为片上后端的光处理系统提供光源。

致谢

本文实验得到了清华大学电子工程系杨益协助,相关研究也得到了中兴通讯股份有限公司的资助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] BALL G A, MOREY W W, GLENN W H. Standing-Wave Monomode Erbium Fiber Laser[J]. IEEE Photonics Society, 1991, 3(7): 613 - 615. DOI: 10.1109/68.87930
- [2] FU S J, SHI W, FENG Y, et al. Review of Recent Progress on Single-Frequency Fiber Lasers[J]. 2017, 34(3): A49-A62. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000A49
- [3] SPIEGELBERG C, GENG J H, HU J D, et al. Low-Noise Narrow-Linewidth Fiber Laser at 1550 nm (June 2003)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 57-62. DOI: 10.1109/JLT.2003.822208
- [4] MO S P, LI Z B, HUANG X, et al. 820 Hz

- Linewidth Short-Linear-Cavity Single-Frequency Fiber Laser at 1.5 μm [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(3): 035101
- [5] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and Optical Masers[EB/OL].(1958-08-26) [2017-08-01]. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.112.1940>
- [6] LAX M. Classical Noise. V. Noise in Self-Sustained Oscillators[J]. Physical Review Letters, 1967, 160(2):290

作者简介



章元珏,清华大学电子工程系硕士研究生;研究方向为光电子技术,主要研究基于光子集成芯片的光纤激光器技术。



李渔,清华大学电子工程系博士研究生;研究方向为集成光子技术,主要研究基于硅集成的新型片上光子系统技术。



陈明华,清华大学电子工程系教授、博士生导师;研究方向为片上光子微系统、微波光子学和高速光信号处理技术。