

· 光学设计 ·

基于虚像相位阵列的锯齿形滤波器研究

曹丹丹, 谭中伟

(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: 边缘滤波器被广泛地应用在光纤光栅传感中, 其工作原理是将波长偏移量转换成光功率的变化, 具有响应速度快、动态检测范围大的优点。为了实现一种周期性边缘滤波器——低损耗锯齿形(JAWS)滤波器, 提出并验证了一种有限反射虚像阵列(FRVIA)。FRVIA 具有较低的后端面反射率, 其输出光强分布、光谱分辨率、输出孔径等方面与 VIPA 存在显著差异。通过数值仿真, 对低损耗滤波器的参数进行优化, 实现了占空比高达 70%、损耗低于 14 dB 的低损耗 JAWS 滤波器。

关键词: 虚像相位阵列; 有限反射虚像阵列; 锯齿形滤波器; 光纤布拉格光栅

中图分类号: TN713.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-01-0010-06

Research on Jammed-array Wideband Sawtooth Filter Based on Virtually Imaged Phased Array

CAO Dan-dan, TAN Zhong-wei

(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: Edge filter has been widely used in fiber grating sensing systems and the principle is to convert the wavelength offset into the change of optical power, which has the advantages of fast response and large dynamic detection range. In order to achieve a periodic edge filter named low-loss jammed-array sawtooth (JAWS) filter, a finite reflection virtually imaged array (FRVIA) is proposed and demonstrated. Comparing with virtually imaged phased array (VIPA), FRVIA has a low reflectivity in the back side, with the differences of output light intensity distribution, spectral resolution and output aperture and so on. By numerical simulation, the parameters of the low-loss JAWS filter have been optimized, a low-loss JAWS filter has been achieved with up to 70% duty cycle and lower than 14 dB loss.

Key words: virtually imaged phased array (VIPA); finite reflection virtually imaged array; jammed-array wideband sawtooth (JAWS) filter; fiber Bragg grating

Shirasaki M^[1]提出虚像相位阵列(VIPA)以来, VIPA以其角度色散大、体积小、成本低等优势被广泛应用在色散补偿、波分复用、光栅传感等众多领域^[2-4]。VIPA 输出光束间相互叠加形成复杂的光谱,为了解决 VIPA 光谱混叠的问题, Shijun Xiao^[5]等人将 VIPA 和衍射光栅结合起来,把光谱映射到

二维平面上,实现了 VIPA 的二维成像,扩大了 VIPA 的应用范围,可用于实现层析成像和气体检测等^[6-8]。VIPA 制成的锯齿形滤波器已被应用在光纤光栅传感中实现波长解调,其工作原理与边缘滤波器相似,利用锯齿波形的斜边将光纤布拉格光栅(FBG)的波长偏移转化成光强度的变化,无需扫

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61177012和61405008)资助

作者简介: 曹丹丹(1992-),女,山西人,硕士研究生,从事光器件与光纤光栅传感方面的研究;谭中伟(1978-),男,河南人,教授,主要从事全光交换、特种光纤及器件、光栅传感、电磁场与微波技术方面的研究。

描整个波长范围,动态监测范围大,且消除了边缘滤波器的分辨率受限于动态检测范围的缺陷,周期性的锯齿波可以为每个传感光栅提供一个边缘滤波器。然而,该滤波器具有超过 20 dB 的损耗,需要使用额外的掺铒光纤放大器来补偿。此外,由于 VIPA 输出光束不准直,很难将光束全部反射回光纤,因此基于 VIPA 的 JAWS 滤波器制作比较困难。文中将提出一种低损耗的 JAWS 滤波器方案,该滤波器可用于实现 FBG 传感的高速解调。

VIPA 是一个两面涂覆高反膜的玻璃板,入射面由反射率高于 99% 高反面和小区域高透镜的入射窗口组成,出射面的反射率一般为 95%~98%。当光束由入射窗口进入到 VIPA 后,在玻璃腔内多次被反射,光束从后端面射出^[10]。当系统需要把 VIPA 出射面的光束反射回光纤时,高反膜(95%)会造成约 13 dB 的损耗,而这是目前 JAWS 滤波器损耗大的主要因素。当 VIPA 被用于大色散和高分辨率光谱的空间分光器^[10],其两个端面必须具有高反膜以增大光束在腔内的谐振,而 VIPA 被应用在 JAWS 滤波器中并不需要该特性。

1 FRVIA 的理论研究

由 VIPA 的定义可知,VIPA 后端面射出的光被分成许多光束,每个光束就像是由一个个等间距的虚像发出,如图 1a 所示。虚拟数量是非常多的,VIPA 后端面的高反膜导致现有的 JAWS 滤波器损耗很大。为了降低 JAWS 滤波器的损耗,提出了通过降低 VIPA 后端面反射率的方法。由于 VIPA 后端面反射率降低,光束在玻璃腔内反射的次数显著减少,光束只能被有限次反射,虚像的数量大幅减少,所以将它称为有限反射虚像阵列(FRVIA),见图 1b 所示。

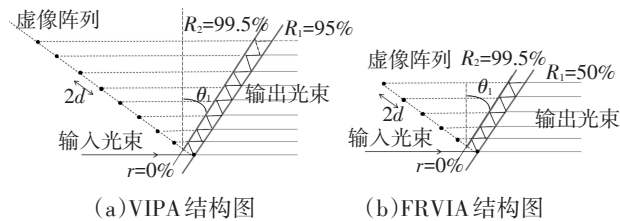


图1 VIPA 结构图及 FRVIA 结构图

由参考文献[9]可知,常见的 VIPA 的输出光强在成像面上的分布为

$$I(y,\lambda) \propto \exp\left(-\frac{2f^2 y^2}{F^2 W^2}\right) \cdot \frac{1}{(1-R_1 R_2)^2 + 4R_1 R_2 \sin^2(\kappa \Delta / 2)} \quad (1)$$

FRVIA 的输出光强在成像面上的分布与 VIPA 的分布有所不同,虚像的个数与 FRVIA 后端面反射率成正比,一定后端面反射率的 FRVIA 对应一定的虚像个数,FRVIA 在成像平面上的输出光强分布为

$$I(y,\lambda) \propto \exp\left(-\frac{2f^2 y^2}{F^2 W^2}\right) \cdot \frac{[1-(R_1 R_2)^e]^2 + 4(R_1 R_2)^e \sin^2(\kappa \alpha \Delta / 2)}{(1-R_1 R_2)^2 + 4R_1 R_2 \sin^2(\kappa \alpha \Delta / 2)} \quad (2)$$

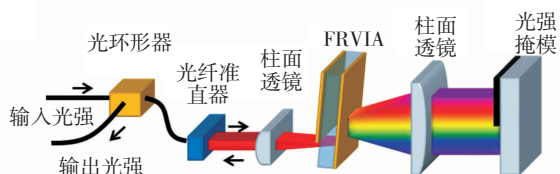
其中, $\Delta = 2dn \cos \theta_1 - 2dn \theta_2 \sin \theta_2 - dn \theta_2^2 \cos \theta_1$; f 是 FRVIA 前柱面透镜的焦距; F 是 FRVIA 后面的傅里叶透镜的焦距; θ_1 是 FRVIA 光束的入射角; W 是准直光束进入柱面透镜前的半径; R_1 和 R_2 分别是 FRVIA 前后端面的反射率; κ 是波矢 ($\kappa = 2\pi/\lambda$); θ_2 是 FRVIA 光束的出射角; α 是虚像的数量; λ 是波长。如果虚像的数量足够大,FRVIA 与 VIPA 的输出光强分布将达到一致。

FRVIA 的输出孔径远远小于 VIPA 的输出孔径。已经计算出当输入光功率的 90% 全部透过 VIPA 时,虚像的个数至少要达到 40 个,而对于反射率为 50% 的 FRVIA,6 个虚像即可实现 1% 的光功率在腔内来回反射,输出孔径比 VIPA 小一个数量级,如图 1 所示。因此,基于 FRVIA 的系统的体积可以更小。此外,由于光束在玻璃板腔内多次反射,所以玻璃板和薄涂覆膜的任何小的误差都会被多次累积,因此 VIPA 的性能对玻璃板和薄涂覆的平行度等特性非常敏感^[11],这将增加设备制造的困难和成本。然而,对于 FRVIA,光束在玻璃板腔内仅能被有限次的反射,有效地抑制了玻璃板和涂覆膜的误差累积影响,所以制造 FRVIA 比 VIPA 要容易得多。

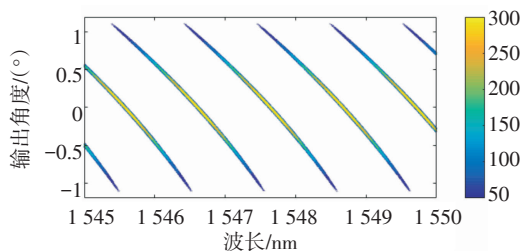
2 低损耗 JAWS 滤波器数值仿真

搭建基于 FRVIA 的低损耗 JAWS 滤波器见图 2a,其结构与基于 VIPA 的 JAWS 滤波器结构相同。根据式(1)和式(2)搭建 Matlab 数值仿真模型,分析 VIPA 和 FRVIA 的输出光强分布情况。基于 VIPA 的 JAWS 滤波器的光学元件参数设置见表 1。VIPA 在成像面上的输出光强度分布如图 2b 所示,不同阶光谱相互混叠,通过与衍射光栅的结合可以

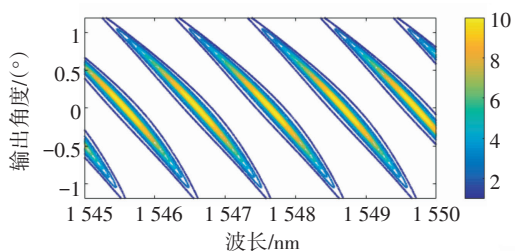
将光谱映射到二维平面上,可以实现二维成像。除了 R_2 和 α ,基于FRVIA的低损耗锯齿形滤波器的参数设置与基于VIPA的JAWS滤波器相同,FRVIA腔内光功率小于1%的虚像个数即为 α 的值,图2c和2d分别为 R_2 等于70%、50%的FRVIA在成像平面上的输出光强分布。随着FRVIA反射率的下降,输出光谱变宽,导致FRVIA的光谱分辨率较VIPA略低。



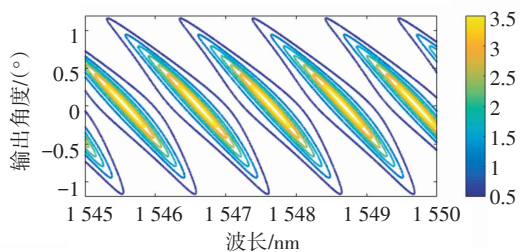
(a)JAWS滤波器的结构图



(b)VIPA的输出光强度分布



(c)反射率为70%的FRVIR输出光强分布



(d)反射率为50%的FRVIR输出光强分布

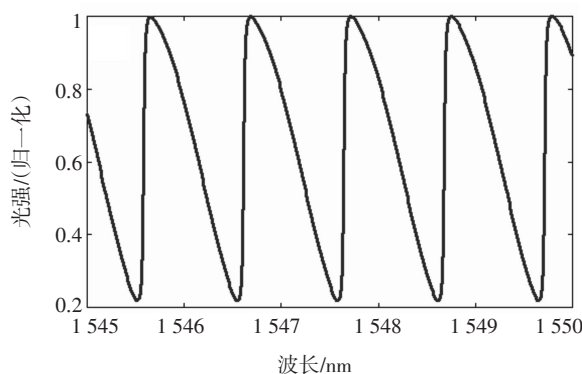
图2 (a)JAWS滤波器的结构图 (b)VIPA的输出光强分布 (c)反射率为70%的FRVIR输出光强分布 (d)反射率为50%的FRVIR输出光强分布

表1 仿真参数的设置

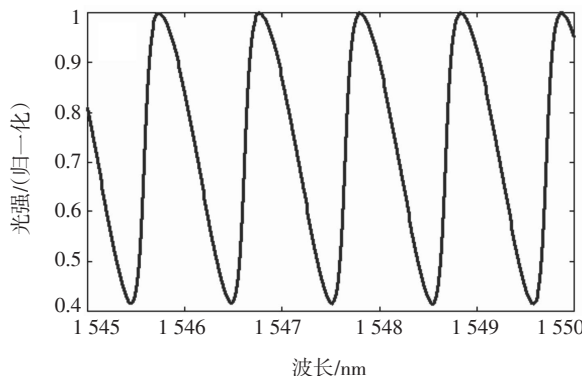
$n=1.45$	$d=0.41\text{ mm}$	$F=100\text{ mm}$	$f=100\text{ mm}$
$R_1=99.5\%$	$R_2=95\%$	$\theta_1=5^\circ$	$W=3\text{ mm}$

利用光掩模板遮住VIPA输出光斑的下半部分,仅上半部分的光反回VIPA中,则实现了JAWS滤波器^[9],其锯齿形光谱见图3a所示。如果将VIPA换成不同反射率的FRVIA,同样可以实现非常好的周期性锯齿波,如图3b~图3d所示。

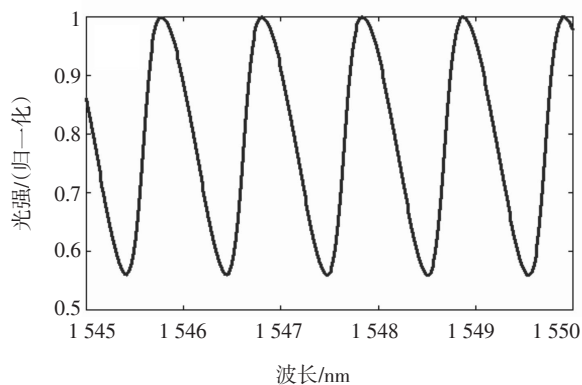
其差异主要表现在锯齿波的有效使用范围,占空比(锯齿边缘的线段与锯齿周期的比例),而它们的自由频谱范围(FSR)并不受影响。



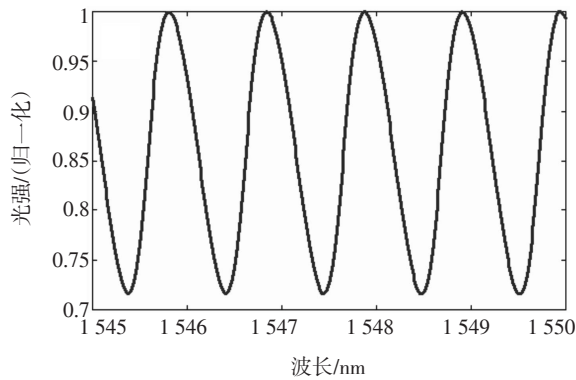
(a)基于VIPA的JAWS滤波器的光谱



(b)基于反射率70%的FRVIA的JAWS滤波器光谱分布



(c)基于反射率50%的FRVIA的JAWS滤波器光谱分布



(d)基于反射率30%的FRVIA的JWAS滤波器光谱分布

图3 (a)基于VIPA的JWAS滤波器的光谱;(b)基于反射率70%的FRVIA的JWAS滤波器光谱分布;(c)基于反射率50%的FRVIA的JWAS滤波器光谱分布;(d)基于反射率30%的FRVIA的JWAS滤波器光谱分布

降低VIPA后端面的反射率,观察周期性锯齿波的性能变化,主要参数有占空比和线性度。其中,线性度指对周期性锯齿波进行曲线拟合,得到回归直线,其值越接近1,回归直线对滤波器工作波长部分的锯齿波拟合程度越好;占空比指锯齿波有效工作波长范围占锯齿波波长的比值,值越大越好。结果见图4所示。

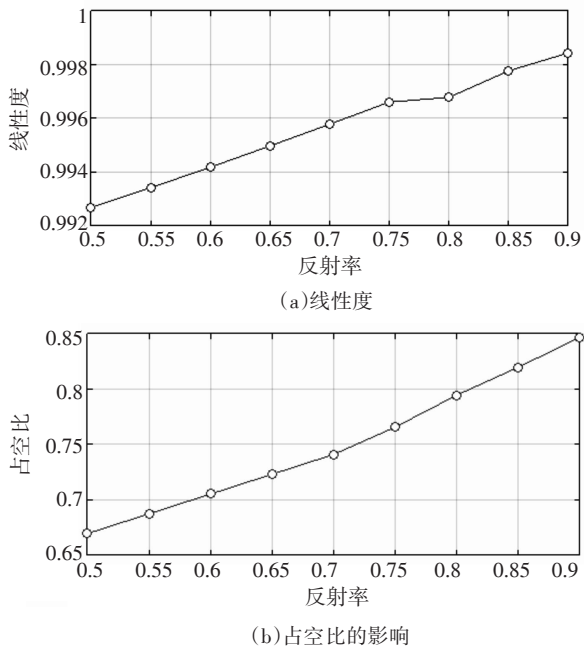


图4 不同后端面反射率条件下对锯齿波线性度及占空比的影响

由图4可知,随着VIPA后端面反射率由90%降低到50%时,锯齿波的线性度和占空比随之下降,降低的幅度分别是0.6%和17%,反射率的降低对锯齿波线性度的影响不明显,但对占空比的影响相对大一些。FBG解调系统的可用带宽和灵敏度都受限于JAWS滤波器的占空比,因此在设计FRVIA时,应该考虑在滤波器的损耗和性能之间进行折衷处理。

由式(2)可知,JAWS滤波器的参数,包括光束进入FRVIA的入射角度、柱面透镜的焦距、进入FRVIA的光束半径等都可能影响到JAWS滤波器的性能。因此,建立了数值仿真模型分析各参数对JAWS滤波器的影响,其中滤波器由后端面反射率为70%、厚度为1 mm的FRVIA构成。

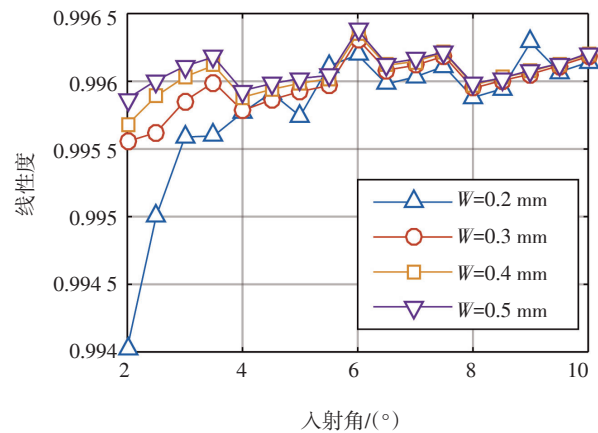
(1)准直光束半径与光束进入FRVIA的入射角对JAWS滤波器的影响

分析准直光束半径和光束进入FRVIA入射角对滤波器的影响时,滤波器其他仿真参数的设置如表2所示。

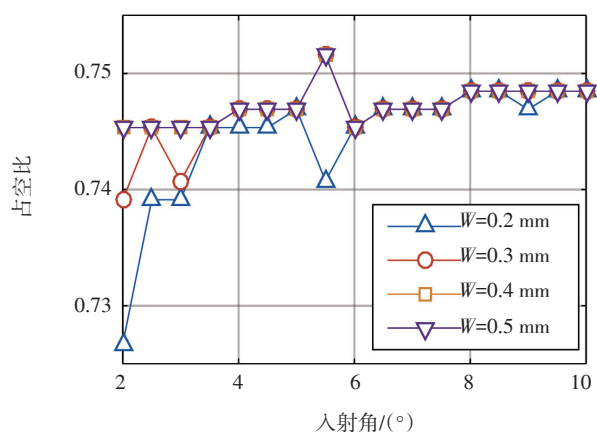
表2 仿真参数的设置

$n=1.45$	$d=1\text{ mm}$	$F=200\text{ mm}$	$f=60\text{ mm}$
$R_1=99.5\%$	$R_2=70\%$	$\theta_2=1^\circ$	$a=15$

入射角以步长 0.5° 在范围 $2^\circ\sim 10^\circ$ 内逐渐增大,准直光束半径分别设置为0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm和0.5 mm。通过数值仿真,得到如图5a、图5b的仿真结果。



(a)线性度



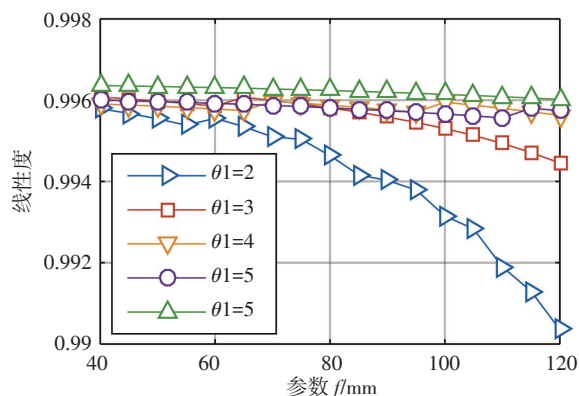
(b) 占空比的影响

图5 不同入射角和准直光束半径对锯齿波线性度及占空比的影响

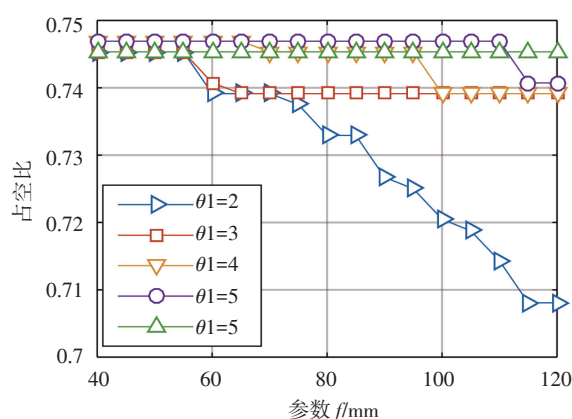
分析图5可知,随着光束进入FRVIA入射角的增加,线性度和占空比随着增大。当入射角小于 4° 时,线性度和占空比显著增大;当入射角大于 4° 时,线性度和占空比几乎不受入射角的影响。当取入射角度为 4° 时,线性度接近最大值0.996,占空比可以达到0.75。同时,随着进入FRVIA准直光束半径的增大,锯齿波的线性度和占空比呈增长趋势且逐渐趋于平稳。当光束半径 W 小于0.3 mm时,在入射角小于 4° 的情况下,线性度和占空比急剧变化,因此选取光束半径时应该避免选择光束半径 W 小于0.3 mm的光束。

(2) 柱面透镜的焦距与光束进入FRVIA的入射角对JAWS滤波器的影响

分析柱面透镜的焦距与入射角对JAWS滤波器的影响时,保持滤波器的其他仿真参数设置不变,将准直光束的半径设置为0.3 mm,柱面透镜的焦距从50 mm以步长5 mm逐渐增加至120 mm,入射角分别设置为 2° 、 3° 、 4° 、 5° 、 6° 。仿真结果如图6a、图6b所示。



(a) 线性度



(b) 占空比的影响

图6 不同柱透镜焦距和入射角对锯齿波线性度及占空比的影响

由图6可知,当入射角为 2° 时,随着柱面透镜焦距 f 的增大,产生的锯齿波的线性度和占空比急剧降低。除去入射角小于 3° 的情况,随着 f 的增大,锯齿波的线性度几乎不发生变化,高达0.996;占空比下降的幅度非常缓慢,仅为0.01,几乎不影响滤波器的性能。同时,随着入射角度的增大,线性度和占空比有缓慢增大的趋势。当入射角度等于 3° ,且柱面透镜焦距 f 大于100时,线性度和占空比分别趋近与0.996和0.75。因此,在设置JAWS滤波器的参数时,应尽量选择焦距较大的柱面透镜,且入射角度不小于 3° 。

3 实验验证

为了验证低损耗JAWS滤波器的性能,采用厚度为0.8 mm且反射率为70%的FRVIA进行了实验,实验中其他参数设计见表1,且FRVIA下半部分的光被挡住。通过分辨率为50 pm的AQ6373光谱仪观察周期性的锯齿波形。在1525~1565 nm的波长范围内,输出光谱如图7a所示。为了精确地分析光谱的特性,放大1542.5 nm到1544.5 nm的范围内的锯齿波形,如图7b所示。结果表明,周期约为0.9 nm的周期光谱均匀分布在1525 nm到1565 nm的范围内,占空比大于70%。与普通JAWS滤波器的反射率相比,基于FRVIA的JAWS滤波器反射损耗从13 dB降低到约5 dB,滤波器的额外插入损耗从20 dB降低到13 dB,锯齿波的占空比大于70%。

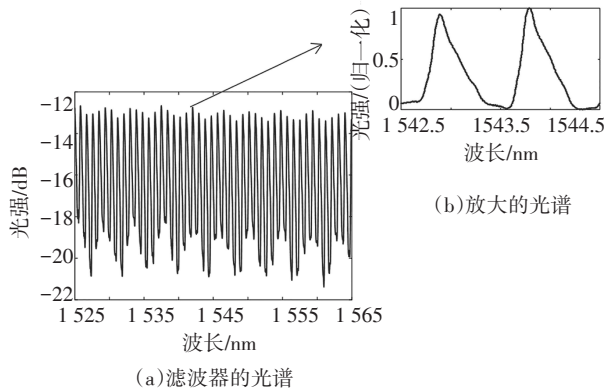


图7 基于0.8 mm厚度FRVIA的JAWS滤波器的实验结果

与此同时,还使用厚度为0.4 mm且反射率为70%的FRVIA构建JAWS滤波器。FRVIA上半部分光被掩模阻挡。1525~1565 nm波长范围内的周期性锯齿波形如图8a所示。放大1553~1560 nm的范围内的光谱得到清楚的三个周期的锯齿波,如图8b所示。

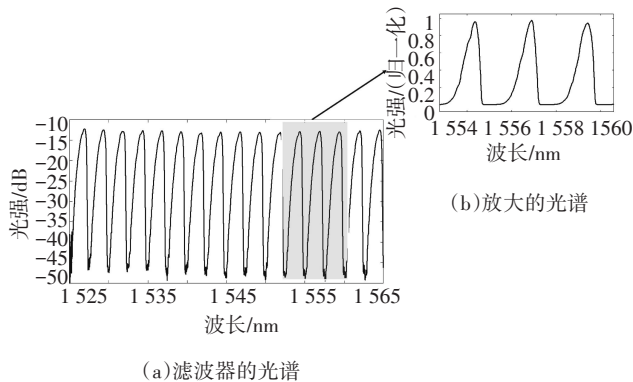


图8 基于0.4 mm厚度FRVIA的JAWS滤波器的实验结果
(a)滤波器的光谱(b)放大的光谱

结果表明,周期为2.5 nm的锯齿形光谱在1525~1565 nm的范围内均匀分布,占空比大于50%,JAWS滤波器的额外损耗降低到约14 dB。

实验发现,实际中JAWS滤波器的范围总是比仿真结果大得多,其主要原因是仿真结果能够显示VIPA后端面输出光束一半的光谱,然而,由于FRVIA或VIPA的输出光束非准直的原因,并不能将一半光束都反射回光纤。各种波长光的输出角度在每个FSR中是不同的。对应锯齿波峰的输出光束总是垂直于镜面,反射回光纤时产生的损耗很小,

而对应锯齿波谷的输出光束是倾斜入射到反射镜中,在反射回光纤时会产生较大的损耗。

4 结论

提出并验证了一种基于FRVIA的低损耗JAWS滤波器,通过降低VIPA后端面的反射率,降低滤波器的损耗。通过数值仿真对JAWS滤波器的主要参数进行了优化。后端面反射率的降低导致FRVIA与VIPA在很多方面存在差异。通过实验搭建低损耗JAWS滤波器,实现了波长范围1525~1565 nm、周期0.9 nm的JAWS,占空比约为75%,损耗由原来的20 dB减小到13 dB以下。此外,研究了周期为2.5 nm的JAWS滤波器,占空比约为60%,损耗降到14 dB左右。低损耗JAWS滤波器将会在高速FBG波长解调、高速锯齿波发生器和DWDM系统的波长检测领域中有很大应用前景。

参考文献

- [1] Shirasaki M. Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(5): 366-8.
- [2] Xiao S, Weiner A M. An eight-channel hyperfine wavelength demultiplexer using a virtually imaged phased-array (VIPA) [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(2): 372-374.
- [3] Ishikawa G, Isono H, Ooi H, et al. 40-Gb/s WDM transmission with virtually imaged phased array (VIPA) variable dispersion compensators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(12): 2196-2203.
- [4] 李睿. 基于周期性无源锯齿波滤波器的应力传感系统的研究[D]. 北京交通大学, 2013.
- [5] Xiao S, Weiner A M, Lin C. A dispersion law for virtually imaged phased-array spectral dispersers based on paraxial wave theory[J]. *Quantum Electronics IEEE Journal*, 2004, 40(4): 420-426.
- [6] Shioda T, Morisaki T, Ono H. Single-shot tomography by means of VIPA and spatial phase modulator installed optical interferometer[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 144-147.
- [7] Wang C, Ding Z, Mei S, et al. Ultra long-range phase imaging with orthogonal dispersive spectral-domain optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4555-7.

(下转第29页)

但同时也看到,加屏蔽罩后的噪声电压并没有完全降至图 1a 无光照情况下的噪声电压,这主要是由于为了保证探测器的通光口和电路连接线的引出,静电屏蔽罩并不是完全密闭,即探测器与激光器脉冲源间仍有自由空间的连接,因此,实验屏蔽罩并没有完全切断电磁波的空间诱导途径。

综上,可以认为自由空间是增强噪声的主要诱导途径,电磁波主要通过自由空间传播直接对探测器工作电路产生影响, u 使探测器噪声增强。

4 结论及建议

实验发现脉冲激光会诱导光电探测器噪声增强,研究表明,增强噪声主要是由于激光器放大级开关电源打开后,储能电容充电放电,产生浪涌电流和尖峰电压使开关电源产生较强的电磁干扰所致,该噪声幅度较大,直接影响探测器的测量准确度和精度;该电磁干扰是通过自由空间传播的方式来影响探测器的电路输出。

因此,对于脉冲型激光器,这种脉冲相关的噪声增强效应不容忽视。基于上述噪声来源和噪声诱导途径的研究结果,采取有效的措施可以有效抑制该类噪声。

静电屏蔽是最有效的方法,可以帮助实验仪器免受外部电磁场的影响,在探测仪器设计时有效考虑电路的屏蔽措施可以大为降低脉冲相关的增强噪声。另外,电磁干扰产生的电磁波强度与传播距离有关,延长探测器件与被测激光器的距离,也可以减小噪声增强效应对测量结果的影响,但不如前

者方便、有效。

参考文献

- [1] 郭赛,丁全心,羊毅.雪崩光电探测器的噪声抑制技术研究[J].电光与控制,2012,19(3):69-73.
- [2] 姜先申,韩焱.光电探测器噪声分析及降低噪声的方法[J].现代电子技术,2005(4):3-4.
- [3] 沈开贵,曾丽珍.40GPIN/TIA 光电探测器接收组件的噪声分析[J].光通信技术,2006,30(9):7-9.
- [4] 解光勇.光电探测器噪声特性分析[J].信息技术,2008(11):8-10.
- [5] Werley C A, Teo S M, Nelson K A. Pulsed laser noise analysis and pump-probe signal detection with a data acquisition card[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(12):488.
- [6] 项晓,王少锋,侯飞雁,等.利用共振无源腔分析和抑制飞秒脉冲激光噪声的理论和实验研究[J].物理学报,2016,65(13):121-128.
- [7] 王凡,王志强.开关电源电磁干扰分析及抑制[J].电源技术应用,2005(4):26-30.
- [8] 阙仲元.电动力学教程[M].北京:人民教育出版社,1979.
- [9] LUO Xin, HAN Xiu-you, GU Yi-ying, et al. Phase noise floor suppression of the output carrier from double sideband-carrier suppressed modulation system[J]. Science China, 2011, 54(6): 1312-1320.
- [10] 陈铭易,楚晓杰,于鹏,等. $A \Delta \Sigma$ fractional-N frequency synthesizer for FM tuner using low noise filter and quantization noise suppression technique[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(7): 075003-1-075003-7.

(上接第15页)

- [8] Kowzan G, Lee K F, Paradowska M, et al. Self-referenced, accurate and sensitive optical frequency comb spectroscopy with a virtually imaged phased array spectrometer[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 974.
- [9] Tan Z, Wang C, Goda K, et al. Jammed-array wideband sawtooth filter[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 19(24): 24563-8.
- [10] Shirasaki M, Akhter A N, Lin C. Virtually imaged phased array with graded reflectivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11: 1443-1445.
- [11] Tan Z, Li H, Ding Z, et al. Two dimensional spectrum detection based on the imperfect virtually imaged phased array[J]. Microwave&Optical Technology Letters, 2017, 59(10): 2654-2660.