

基于虚像相位阵列的高分辨率光纤光栅传感解调

陈志伟 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 用虚像相位阵列(VIPA)和红外成像系统来实现高分辨率的布拉格光纤光栅(FBG)的波长解调,通过 VIPA 结合衍射光栅,使输出的光束按波长分布到二维平面上,实现波长与成像面上空间坐标的一一映射,然后使用红外成像系统来检测。整套装置没有可移动部件,具有很好的可重复性、稳定性和可靠性。通过实验对该方法进行了验证,具有较高的分辨率,系统的分辨率小于 2 μm 。

关键词 光学设计;布拉格光纤光栅解调;虚像相位阵列;红外成像系统

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0422003

High Resolution Demodulation for Fiber Grating Sensors Based on Virtually-Imaged Phased Array

Chen Zhiwei Tan Zhongwei

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

Abstract It is proposed and demonstrated that a method to realize the fiber Bragg grating (FBG) demodulation based on virtually-imaged phased array (VIPA) and infrared imaging system. Two-dimensional (2D) spectral imaging can be realized by using VIPA and diffraction grating. The wavelength of the gratings can be integrated by analyzing the imaging of the infrared camera. It has no moving parts. The reproducibility, stability and reliability of the system is perfect and its resolution is higher than the traditional charge-coupled device (CCD) method by using VIPA as dispersive device instead of volume diffraction grating. The resolution of the system is better than 2 μm .

Key words optical design; fiber Bragg grating demodulation; virtually-imaged phased array; infrared imaging system

OCIS codes 220.3620; 220.4840; 230.1150; 230.1950

1 引 言

布拉格光纤光栅(FBG)传感器因具有抗电磁干扰、灵敏度高、尺寸小、重量轻、成本低和易于多点复用等优点^[1],常被运用在土木工程结构监测、航空航天、飞机结构健康监测、发电机、超导、核融合性、铁路交通监测和石油勘探^[2]等领域。与其他光纤传感技术相比,光纤光栅传感器最突出的特点是传感器检测的是波长的变化,从微小的波长变化中提取传感信息^[3]。与强度检测相比,波长的精确检测所需要的成本更高、速度更慢,因此高精度、快速的波长

解调是光纤光栅传感器的关键技术^[4]。

基于电荷耦合器件(CCD)的传统波长解调是将光纤光栅反射回来的光通过准直器入射到衍射光栅等色散器件中,利用衍射光栅的角色散将不同波长的光在空间中展开,再经过透镜准直后就可以在傅里叶平面上得到光谱的线性分布,利用线阵 CCD 就可以检测光栅的波长变化。该方法的优点是静态检测,没有机械扫描机构,因此性能稳定,响应速度也较快。但是 CCD 的波长响应范围在 400~1100 nm,而 FBG 传感解调波长在 1500 nm 附近,如果用 CCD

收稿日期: 2012-11-05; **收到修改稿日期**: 2012-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61177012)和北京交通大学科研基金(2009JBM011)资助课题。

作者简介: 陈志伟(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感和光信息处理等方面的研究。

E-mail: 08120072@bjtu.edu.cn

导师简介: 谭中伟(1978—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事高速光纤通信网、光纤传感和光信息处理等方面的研究。E-mail: tanzwei@126.com(通信联系人)

进行解调,不得不镀膜而增加额外的成本。由于 InGaAs 光电二极管阵列的波长响应范围是 800~1700 nm,而且在 1500 nm 波长附近具有很高的量子效率和反应灵敏度^[5],因此近来多采用该方法研制光纤光栅解调系统,但是其算法比较复杂,波长解调的准确性也不是很理想。同时需要使用高灵敏度的 InGaAs 阵列才能获得好的波长分辨率,因此 InGaAs 阵列的成本也较高。

本文用虚像相位阵列(VIPA)和红外成像系统来做高分辨率的 FBG 传感器系统,由于 VIPA 的输出光束是周期性混叠的,因此需要将 VIPA 和衍射光栅结合起来,使光谱二维展开,这样实现不同波长和空间中不同位置的一一映射。与衍射光栅相比,VIPA 能产生更大的角色散,而且其波长分辨率也高一个量级,克服了传统的解调方法光谱分辨率低和准确性不高的缺点。同时,由于 VIPA 能够将波长投影到二维平面上,因此有更多的像素点和更高的波长分辨率。在多通道光纤光栅传感器中能提供更精确、更可靠的波长解调,系统的光谱分辨率小于 2 pm。

2 基于 VIPA 的二维光谱映射

VIPA 是一块双面镀膜的玻璃平板,平板的入射面除入射窗口区域镀增透膜(AR)外,均镀反射率大于 99%的高反膜,出射面镀反射率为 95%~98%的高反膜。其结构如图 1 所示,入射光以很小的入射角从入射窗口进入玻璃平板,被聚焦到出射面。入射光的一小部分(约占总能量的 2%)从高反层出射,经过光束束腰后发散。其余的光在玻璃板中被再次反射,又有一部分从高反层出射。多次反射之后,入射光将被分成许多位移为常量的光束。每条光束都可以看成是由一个虚像发出的。光束腰的虚

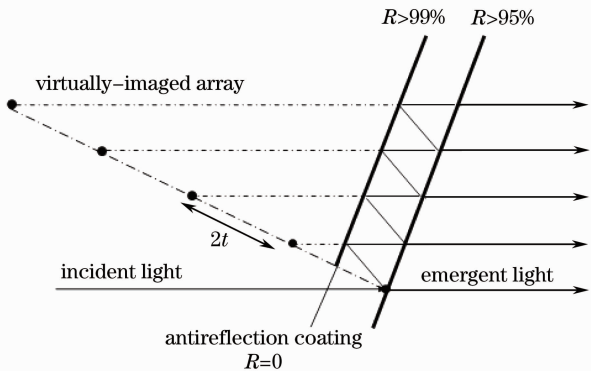


图 1 VIPA 的基本原理

Fig. 1 Basic principle of VIPA

像沿着玻璃板的法线方向自准直,因此像到像的间距是一个恒量,约等于玻璃平板厚度的两倍。它们仿佛产生于一个光的相位阵列,因此称作 VIPA^[6]。

在理想情况下,这些虚像的输出光发生干涉,再利用薄透镜进行空间傅里叶变换,就可以得到在成像面上的光场分布为^[7]

$$I(y, \lambda) \propto \exp\left(-\frac{2f_1^2 y^2}{f_2^2 W^2}\right) \times \frac{1}{(1 - R_1 R_2)^2 + 4R_1 R_2 \sin^2(\kappa \Delta / 2)}, \quad (1)$$

式中 $\Delta = 2nd \cos \theta_1 - 2nd \sin \theta_1 / F - ndy^2 \cos \theta_1 / F^2$, f 为光束入射到 VIPA 之前用来压缩光束的柱面镜的焦距, F 为傅里叶透镜的焦距, θ_1 为光束进入 VIPA 的入射角, R_1 和 R_2 为两个反射面的反射率, W 为柱面镜之前的准直光的束腰光斑尺寸, d 和 n 为 VIPA 的厚度和折射率, $\kappa = 2\pi/\lambda$ 为波数, θ_2 为输出光束的角度。在(1)式中,第一项是高斯函数,相比而言,高斯函数是一个缓变函数,可以看成是光斑的包络,因此光斑在 y 方向上的分布仍为高斯函数。第二项是一个周期性的洛伦兹函数,其谐振条件是

$$\kappa \Delta = \kappa(2nd \cos \theta_1 - 2nd \sin \theta_1 - nd \theta_2^2 \cos \theta_1) = 2m\pi. \quad (2)$$

这是一个关于 θ_2 和 κ 的周期性函数,它决定了 VIPA 的输出光束是关于空间分布和波长的周期性函数。能量主要集中在满足谐振条件的角度输出的光束上^[8~11]。

在理想情况下,与产生的虚像数量 N 很大的时候,VIPA 的光谱分辨率,也就是它的有限的光谱的半峰全宽(FWHM)可以表示为

$$\omega_{1/2} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi nd \cos \theta_1} \frac{1 - R_1 R_2}{\sqrt{R_1 R_2}}. \quad (3)$$

根据上面的计算方法,可以得到不同厚度的 VIPA 的光谱分辨率,结果如图 2 所示。对于厚度大于 2 mm 的 VIPA,其光谱分辨率小于 10 pm,远优于普通衍射光栅的分辨率。 R_1 和 R_2 分别为 99.5%和 95%; $n=1.45$, $\lambda_0=1550$ nm 是中心波长, $\theta=1^\circ$ 是光束进入 VIPA 的入射角。

在理想的情况下,VIPA 的光谱分辨率基本与厚度成反比,与入射角关系不大,当入射角增大的时候,光谱分辨率略有增大。如果选用 $d=10$ mm 的 VIPA,其光谱分辨率可以达到 1.9 pm。

光纤光栅的波长解调的精度不仅取决于光谱分辨率,更取决于角色散和傅里叶透镜的焦距^[12~15]。

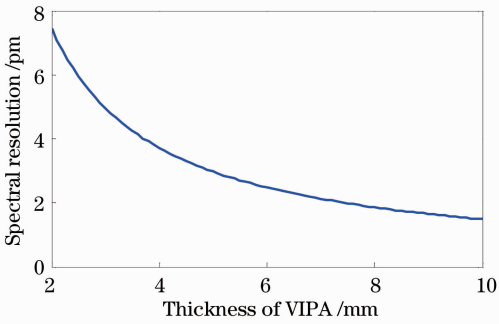


图2 不同厚度 VIPA 的光谱分辨率

Fig.2 Spectral resolution with different thicknesses of VIPA

VIPA 的最初设计目的就是为了实现大的角色散, 它的角色散也远高于常用的衍射光栅。在入射角和出射角都很小的情况下, 角色散可以近似为

$$\frac{d\theta_2}{d\lambda/\lambda_0} = -\frac{1}{\frac{\sin 2\theta_1}{2(n^2 - \sin^2 \theta_1)} + \frac{\theta_2}{n^2}} \approx -\frac{n^2}{\theta_1}, \quad (4)$$

即角色散基本与入射角成反比。

为了得到更大的角色散和空间分辨率, 应该避免使用过小的入射角。而为了降低损耗和保证产生的虚像数量 N 、增大视场的面积, 不能使用大的入射角, 因此在成像时一般选择入射角在 $1^\circ \sim 3^\circ$ 范围内。

需要特别说明的是, 此时在成像面上光束只具有在 y 方向上的一维分布, 即在 x 方向上不具有任何信息。因此, 要使光谱二维展开, 需要将 VIPA 和衍射光栅结合起来。将一个衍射光栅放在 VIPA 之后, 如图 3 所示, 传感探头输出的光经环形器送入光纤传输, 经准直透镜和会聚透镜入射到 VIPA 上, 在 y 方向上产生较大的色散。将 VIPA 输出的光束通过衍射光栅, 使周期性混叠的光在 x 方向展开。其中, 柱面镜 2 是 y 方向上关于 VIPA 的傅里叶透镜, 柱面镜 3 是 x 方向上关于光栅的傅里叶透镜。设计系统时, 应使它们的成像面重合在红外成像系统处。这样, 在比较靠近中间的区域, 光谱在成像面上二维展开, 光谱与空间中的点成一一对应的关系, 再由红外成像系统的探测器检测不同波长的光强分布。

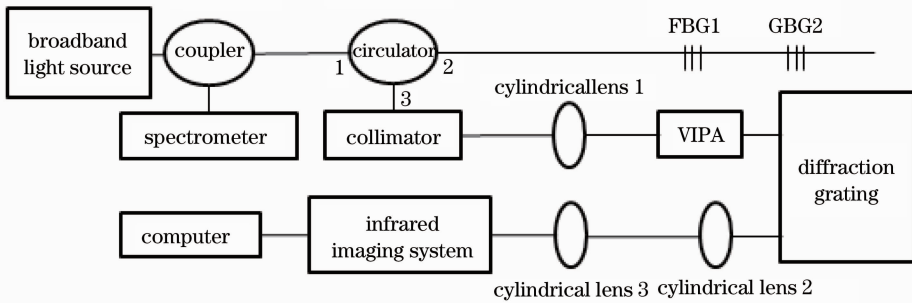


图3 VIPA 和衍射光栅共同产生二维光谱分布的实验结构图

Fig.3 Experimental structure diagram of two-dimensional spectral distribution produced by VIPA and diffraction grating

3 实验组成与过程

具体使用方法如图 3 所示, 用掺铒光纤放大器的自发辐射(ASE)做宽带光源。衍射光栅的选择和波长范围有关, 而波长范围取决于光栅的起始波长和光栅的线数, 波长越长则色散越大, 可选择的波长范围越小, 本实验中选择 1100 line/mm 的衍射光栅。红外成像系统选用的是 Xenics 公司的 XC130 红外成像系统, VIPA 前的柱面镜的焦距 $f_1 = 150$ mm, VIPA 后的柱面镜 2 的焦距 $f_2 = 200$ mm, 柱面镜 3 的焦距 $f_3 = 150$ mm, VIPA 前的光束的入射角为 $\theta_1 = 1^\circ$, 柱面镜之前的准直光的束腰光斑尺寸为 $a = 1$ mm。

如图 3 所示, 传感光纤光栅受到应力或温度变

化的影响导致布拉格波长变化, 随着波长的变化, 检测到输出光束的位置也会相应地变化, 两者间呈线性关系。自发辐射的光信号从环形器的 1 端口进入, 光纤光栅反射的光信号从环形器 2 端口进入, 再从 3 端口出射, 随后经准直后由 VIPA 结合衍射光栅分光, 使其光谱二维展开, 然后将分光后的光束成像于红外成像系统上, 最后输入计算机中进行后续的分析处理。同时, 使用一台光谱仪作校准和比较。

需要指出的是柱面镜的焦距和口径要根据系统数值孔径和系统像差容限确定, 大的数值孔径能增加系统的集光能力, 使系统能检测到更弱的光信号。但是数值孔径过大会影响成像光谱质量, 使得整体光谱分辨率降低; 若数值孔径过小, 则无法提供足够

的检测光能。

4 实验结果与分析

实验除了在红外成像系统上显示位移变化之外,还利用光谱仪对同组光栅在不同的应变条件下的波长进行校准和比较,通过比较两种仪器的测量数据是否一致来判断本系统的准确性。实验系统采用的是 ANDO 公司生产的型号为 AQ6317B 的光谱仪。

从两组测得的结果来看,传感光栅的应变导致波长变化,当波长变化量在 0.5 nm 时,光谱仪和红外成像系统都能测出差别。当 1542.93 nm 和 1543.67 nm 的两个光栅的光谱在波长变化量为 0.0840 nm 时,如图 4 所示,实线 a 为两个光栅的原始光谱;虚线 b 和点划线 c 分别为光栅受到小应力和大应力时,反射波长形成的光谱。可以看出,由于光谱仪的光谱分辨率较差,两个光纤光栅的光谱已经部分地交叠在一起。

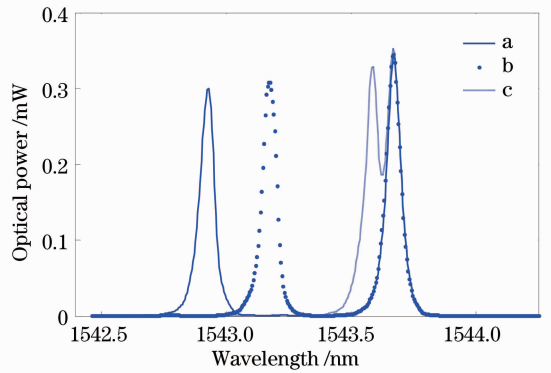


图 4 光谱图

Fig.4 Spectra chart

结合了 VIPA 和红外成像装置的系统,由于具有更好的光谱分辨率,可以明显地测出两个光纤光栅光谱的差别,如图 5 所示。

把这些数据传输到计算机之后,把原本的 jpg 格式的图像转存成 16 位的 bmp 格式,随后在 Matlab 软件里面用 imread 命令读取图像的数据阵列信息,用 contour 命令把阵列画出来,得到图 6 所示的结果。

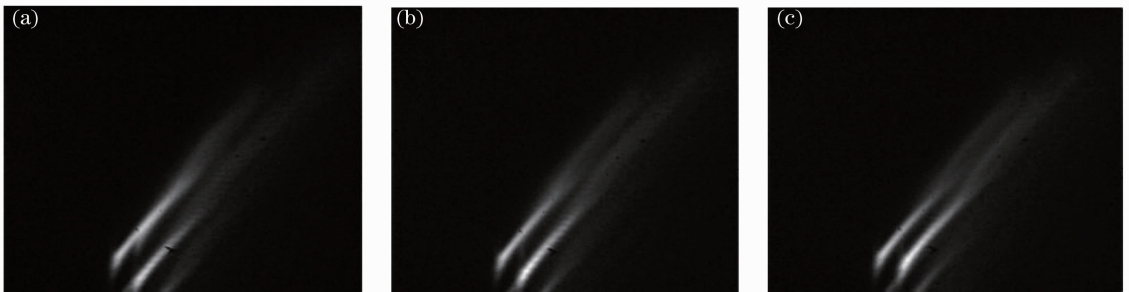


图 5 波长偏移引起的图像位置变化

Fig.5 Imaging positions vary with wavelength shifts

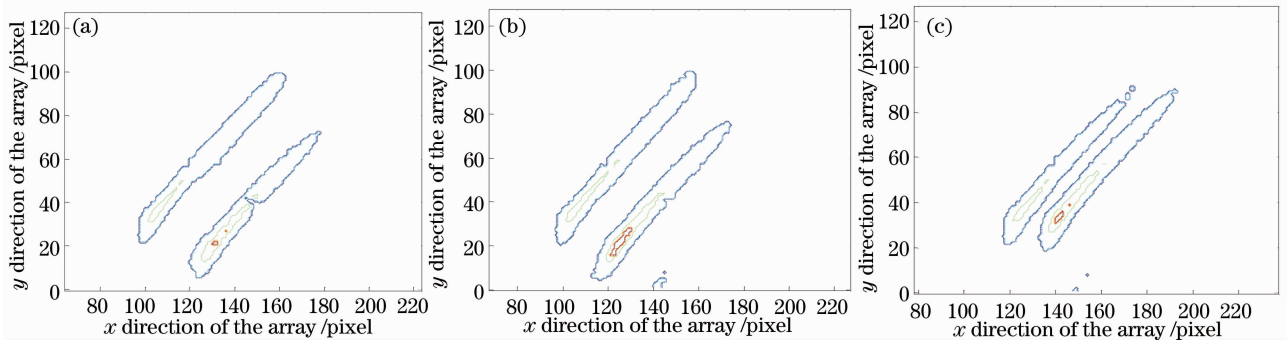


图 6 Matlab 软件的运算结果

Fig.6 Operational results of Matlab

使用这种方法,如图 6 所示,可以精确读取光斑对应点的 x 、 y 的坐标值。随后,照这个方法取得了当光谱宽带光源的波长变化量为 0.02 nm 时的 14 组数据,处理之后,可以看出在红外成像系统上有三个周期的光斑成像,如图 7 所示。

另外,由于 XC130 红外成像系统显示的图像阵列(即点阵大小)为 320 pixel \times 256 pixel,对应的大小为 9.6 mm \times 7.6 mm,所以其点阵间距为 0.03 mm \times 0.0296875 mm。根据点阵间距可以求出位移的变化,最终结果如图 8 所示。

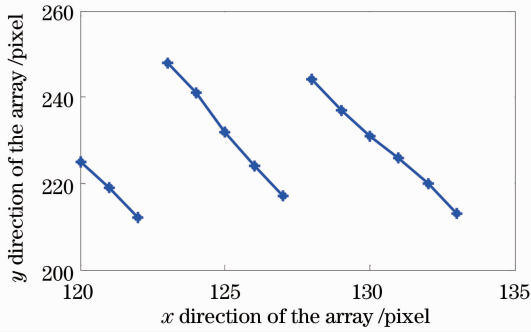


图7 波长等间隔变化时光斑的位置关系

Fig. 7 Position relationship of the light spot while wavelength interval changes

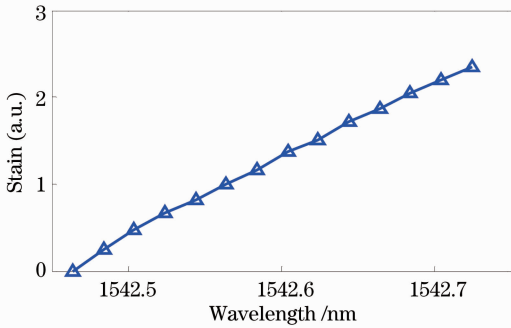


图8 波长与横向位移的关系

Fig. 8 Wavelength vary with the strain

角色散按(4)式来计算, $n = 1.5$, $\theta_1 = 1^\circ = \pi/180$, 再利用

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\theta_2}{d\lambda} f_2 \approx -\frac{n^2}{\theta_1} \lambda_0 f_2, \quad (5)$$

即线色散等于角色散乘以焦距, 其中 dl 为线宽, 按(3)式来计算, R_1 和 R_2 是两个反射面的反射率, 分别为99.5%和95%; d 和 n 是 VIPA 的厚度和折射率, 其中 $d = 3$ mm, $n = 1.45$ 柱面镜 2 的焦距 $f_2 = 200$ mm, 实验中选择了 3 mm 厚的 VIPA, 光谱分辨率按照(5)式来计算, $\lambda_0 = 1550$ nm 为中心波长, θ_1 为光束进入 VIPA 的入射角, 值为 1° . 点阵间距为 0.03 mm \times 0.0296875 mm, 按照(5)式计算的最小的光谱分辨率为 1.86 pm.

5 结 论

用 VIPA 和红外成像系统来做高分辨率的 FBG 传感器系统, 利用 VIPA 能产生大的角度色散, 使各个波长的光以不同的角度出射。由于 VIPA 的输出光束是周期性混叠的, 因此需要将 VIPA 和衍射光栅结合起来, 使光谱二维展开, 这样实现不同波长和空间中不同位置的一一映射, 克服传统方法的光谱分辨率低的缺点。系统的波长分辨

率小于 2 pm。整套装置无可移动部件, 有很高的可重用性、稳定性和可靠性。在多通道光纤光栅传感器中能提供更精确、更可靠的波长解调。

参 考 文 献

- 1 T. H. T. Chan, L. Yu, H. Y. Tam *et al.*. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation [J]. *Engineering Structures*, 2006, **28**(5): 648~659
- 2 Mu Lei. The Study on the Fiber Bragg Grating Demodulation System Based on Infrared CCD [D]. Wuhan: Wuhan Ligong University, 2008. 24~25
- 3 穆磊. 基于红外 CCD 器件的光纤光栅解调系统的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008. 24~25
- 3 M. Shirasaki. Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5): 366~368
- 4 Luo Haiyan, Liu Yongzhi. Progress and application of the virtually imaged phase array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2): 33~35
- 4 罗海燕, 刘永智. 虚像相位阵列的研究进展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(2): 33~35
- 5 Li Guoyu, Liu Bo, Guo Tuan *et al.*. Interrogation for fiber grating sensors based on the linear InGaAs photodiode array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1591~1594
- 5 李国玉, 刘波, 郭团等. 基于线阵 InGaAs 光电二极管阵列的光纤光栅传感解调[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1591~1594
- 6 Tan Zhongwei, Chen Zhiwei, Shen Xiaoxiao *et al.*. 2D spectral imaging based on a virtually-imaged phased array [C]. The 10th National Photoelectric Technology Academic Exchange, GD09~054
- 6 谭中伟, 陈志伟, 沈笑笑等. 基于虚像相位阵列的二维光谱映射[C]. 第十届全国光电技术学术交流会, GD09~054
- 7 S. J. Xiao, A. M. Weiner, C. Lin. A dispersion law for virtually imaged phased - array spectral dispersers based on paraxial wave theory [J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 2004, **40**(4): 420~426
- 8 H. Ooi, K. Nakamura, Y. Akiyama *et al.*. 40-Gb/s WDM transmission with virtually imaged phased array (VIPA) variable dispersion compensators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12): 2196~2203
- 9 Zhongwei Tan, Chao Wang, Keisuke Goda *et al.*. Jammed-array wideband sawtooth filter [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(24): 24563~24568
- 10 X. Shijun, A. M. Weiner. An eight-channel hyperfine wavelength demultiplexer using a virtually imaged phased-array (VIPA) [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 372~374
- 11 X. Shijun, A. M. Weiner. 2-D wavelength demultiplexer with potential for ≥ 1000 channels in the C-band [J]. *Lasers and Electro-Optics Society*, 2004, **16**(2): 573~574
- 12 G. Scarcelli, S. H. Yun. Multistage VIPA etalons for high-extinction parallel Brillouin spectroscopy [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(11): 10913~10922
- 13 S. T. Cundiff, A. M. Weiner. Optical arbitrary waveform generation [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(11): 760~766
- 14 K. Goda, K. K. Tsia, B. Jalali. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena [J]. *Nature*, 2009, **458**(7242): 1145~1149
- 15 K. K. Tsia, K. Goda, D. Capewell *et al.*. Performance of serial time-encoded amplified microscope [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10016~10028