

基于阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调技术综述

李科 董明利 袁配 鹿利单 孙广开 祝连庆

Review of fiber Bragg grating interrogation techniques based on array waveguide gratings

Li Ke Dong Ming-Li Yuan Pei Lu Li-Dan Sun Guang-Kai Zhu Lian-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 094207 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212063

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212063>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

亚波长介质光栅/MDM波导/周期性光子晶体中双重Fano共振的形成及演变规律分析

Analysis of formation and evolution of double Fano resonances in sub-wavelength dielectric grating/MDM waveguide/periodic photonic crystal

物理学报. 2022, 71(3): 034202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211491>

氧化石墨烯修饰倾斜光纤光栅 10^{12} 级重金属离子传感

Graphene oxide modified tilted fiber Bragg grating for 10^{12} level heavy metal ion sensing

物理学报. 2022, 71(5): 050702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211315>

光纤光栅对的参数匹配与激光输出特性

Fiber gratings matching and output characteristics of fiber laser

物理学报. 2019, 68(11): 114205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190178>

对称熔融拉锥型光纤光栅温度和应力传感特性

Temperature and stress sensing characteristics of symmetrically fused tapered fiber grating

物理学报. 2019, 68(24): 244204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191034>

一种结合增益耦合分布反馈光栅的多模干涉波导半导体激光器的研制

Design of a multimode interference waveguide semiconductor laser combining gain coupled distributed feedback grating

物理学报. 2019, 68(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190744>

一种高灵敏度复合环形腔结构的光纤激光拍频位移传感方案

High sensitivity fiber displacement sensor based compound ring laser cavity with linear variation of beat frequency signal

物理学报. 2020, 69(18): 184217 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200385>

综述

基于阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调技术综述*

李科¹⁾²⁾ 董明利^{1)3)†} 袁配¹⁾²⁾ 鹿利单¹⁾²⁾ 孙广开¹⁾²⁾ 祝连庆^{1)2)‡}

1) (北京信息科技大学, 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192)

2) (北京信息科技大学, 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016)

3) (北京信息科技大学, 北京市光电测试技术重点实验室, 北京 100192)

(2021 年 11 月 7 日收到; 2022 年 1 月 10 日收到修改稿)

基于阵列波导光栅的光子集成解调技术是硅光领域的研究热点和难点. 相比传统解调方法, 基于阵列波导光栅的光子集成解调技术因其解调精度高、解调速度快、封装体积小等优势, 在光纤布拉格光栅的高速、高精度解调上具有明显优势. 近年来, 随着光子集成技术的发展, 各科研院所和相关机构对阵列波导光栅的光子集成解调法进行了广泛深入的研究与优化. 本文通过介绍阵列波导光栅工作原理及基于阵列波导光栅的光纤布拉格光栅波长解调原理, 结合基于阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调仪在材料体系和系统性能两个方面的重要进展, 归纳了基于阵列波导光栅的解调仪的典型应用场景, 从新材料、系统集成和规模化三方面对光纤布拉格光栅解调系统的未来发展提出针对性建议, 为基于阵列波导光栅的光子集成解调技术的研究发展提供参考.

关键词: 光纤布拉格光栅, 波长解调, 阵列波导光栅, 光子集成回路**PACS:** 42.81.Qb, 42.70.-a, 42.82.-m, 42.82.Gw**DOI:** 10.7498/aps.71.20212063

1 引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 作为一种新型的光纤无源器件, 具备抗电磁干扰性强、灵敏度高、结构简单等特点, 在航空航天、深海探测等领域受到了广泛的关注和应用^[1-3]. 目前, FBG 传感器在这些领域的应用正朝着高低温、极限加速度及高频振动等极限环境测量方向不断深入, 其波长解调系统的分辨力、解调速度、范围解调、动静态波长解调和制造成本面临更高需求和考验.

为了实现对 FBG 波长的解调, 从而得到 FBG

的波长编码温度或压力变化, 不同方法应运而生, 常见的解调方法有边缘滤波法、匹配光栅滤波法^[4]、可调谐法布里-珀罗滤波法^[5]、非平衡马赫-曾德尔干涉法^[6]和可调谐窄带光源法等. 以上解调技术的发展已经较为成熟, 其优缺点非常突出. 边缘滤波法的显著优势是可以在静态信号和动态信号监测中表现出较好的解调能力, 但其解调分辨率低、解调速度慢, 适用于如振动信号监测、水声信号探测等解调要求不高的场所. 匹配光栅滤波法的抗电磁干扰能力较强, 结构简单, 但由于每一个传感 FBG 需要对应一个匹配 FBG, 因此能检测的 FBG 数是有限的, 此外, 其解调速度也不高. 可调谐法布里-

* 高等学校学科创新引智计划 (先进光电子器件与系统学科创新引智基地)(批准号: D17021)、国家自然科学基金 (批准号: 51705024) 和北京市教育委员会科技计划重点项目 (批准号: KZ201911232044) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongml@bistu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: lqzhu_bistu@sina.com

珀罗滤波法的解调精度高, 滤波效果好, 但它不能用于动态信号的检测, 解调速度与价格也限制了其推广. 非平衡马赫-曾德尔干涉法在对动态参量的测量中可以达到很快的响应速度和很高的分辨率, 但其抗电磁干扰能力差, 不适用于检测静态波长变化. 可调谐窄带光源法有较高的分辨率和信噪比, 但它的可调谐范围窄且成本高, 因此仅适用于特定场合的 FBG 波长解调, 无法推广使用. 近年来, 随着光子集成电路 (photonic integrated circuit, PIC)^[7-13] 的高速发展, 基于 PIC 技术的 FBG 解调系统开始进入人们的视野, 这种解调系统在保持高性能的同时具有结构紧凑、功耗低等特点, 引起了人们对 FBG 解调系统的尺寸、性能等方面的思考, 从而展开了广泛的研究.

PIC 技术可利用平面光波导将光发射、光耦合、光传输、光接收以及光处理等器件进行连接并集成到同一衬底上, 解调系统的尺寸得以减小, 稳定性得以增强. 基于 PIC 技术的解调系统一般采用阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 作为其核心分光器件. AWG 作为无源器件, 内部无机械运动部件, 解调速度只受探测器 (photodetector, PD) 响应速度和模拟/数字 (analog/digital, A/D) 采样率的制约, 同时, 利用 AWG 的波分复用特性, 可实现对多个 FBG 传感器的同时测量, 以此可以实现 FBG 的高速解调. 因此, 基于 AWG 的光子集成解调法具有尺寸小、解调速度快等优势, 通过 AWG 结构设计, 就有望在此基础上设计出小型化、高精度、高速率的解调系统.

本文从 AWG 基本工作原理以及基于 AWG 的光子集成波长解调基本原理出发, 从材料和性能两个方面介绍基于 AWG 的 FBG 解调仪的研究进展, 并列举了基于 AWG 的 FBG 解调仪的实际应用, 最后提出目前存在的主要问题和对未来发展的建议.

2 基于 AWG 的解调仪解调原理

AWG 的基本结构示意图如图 1 所示, 主要包括输入/输出波导、输入/输出平板波导 (自由传播区)、阵列波导等五部分组成, 其中自由传播平板波导采用罗兰圆结构, 即罗兰圆与光栅圆相内切, 且罗兰圆半径为光栅圆的一半. 含有多个波长的复用光波耦合进入输入波导, 在输入平板波导内衍射发

散, 并耦合进入阵列波导区. 由于阵列波导端面均匀排列在光栅圆周上, 所以衍射光以相同的相位到达阵列波导端面, 然后经过长度差为 ΔL 的阵列波导传输后, 产生了相位差, 不同波长的相位差也不同, 于是不同波长的光被输出平板波导聚焦到不同的输出波导位置, 从不同的输出波导输出, 完成解复用功能^[14].

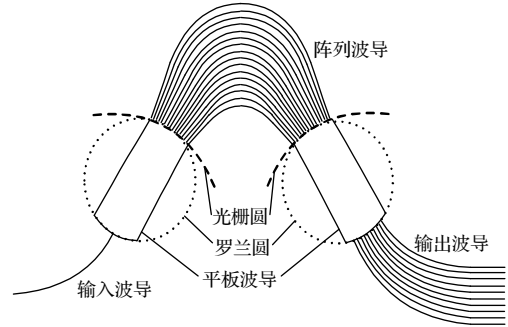


图 1 AWG 结构示意图
Fig. 1. Structural diagram of AWG.

基于 AWG 的 FBG 波长解调系统架构如图 2 所示, 从宽谱光源发出来的光, 经环形器到达 FBG, 从 FBG 反射回来某波长的窄带高斯光, 该高斯光束经由环形器进入 AWG, AWG 的波分复用功能可实现分光, 输出的光信号经光电转换、放大滤波、A/D 数据处理完成对 FBG 波长的解调^[15].

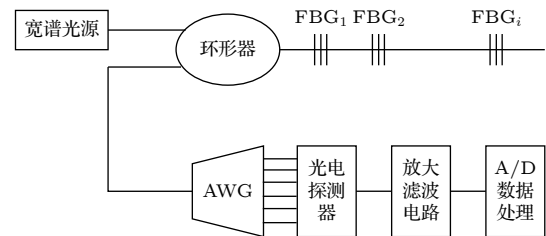


图 2 基于 AWG 的 FBG 波长解调系统
Fig. 2. FBG wavelength interrogation system based on AWG.

基于 AWG 的 FBG 波长解调系统有多种解调方法, 如可调谐滤波法、边缘滤波法、相对强度解调法等. 可调谐滤波法是将 AWG 作为滤波器解调, AWG 每个输出通道的波长会随 AWG 温度变化而变化, 当某一输出通道的光功率达到最大值时, FBG 的波长即为该通道的峰值波长. 因此, 只需知道 AWG 波长随温度的变化规律, 便可解调出 FBG 的波长.

边缘滤波法^[16-18]解调原理如图 3 所示, 其中 λ_{m-1} , λ_m , λ_{m+1} 是随外界物理量变化而发生漂移

的 FBG 中心波长, $P_{\lambda_{m-1}}, P_{\lambda_m}, P_{\lambda_{m+1}}$ 是该 AWG 同一输出通道与之对应的输出光功率, 实线为 AWG 输出通道透射谱, 虚线为 FBG 反射谱. 光从 FBG 反射回来, 其波长对应一个 AWG 输出通道的通带边缘, FBG 中心波长的变化被转换为该 AWG 输出通道传输的光功率变化, 利用 FBG 波长与 AWG 输出通道边缘光功率关系可以实现对 FBG 波长的解调^[19].

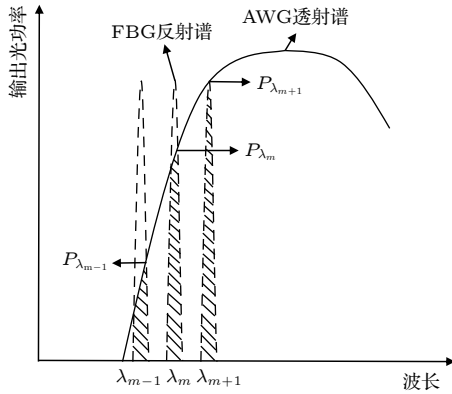


图 3 AWG 边缘滤波法波长解调原理图

Fig. 3. Wavelength interrogation principle of edge filtering method using AWG.

相对强度解调法^[20,21]理论上不受光源输出光功率抖动及 FBG 带宽等的制约, 其利用两路信号解调一个 FBG 波长, 精度相对较高, 因此相对强度解调法备受青睐. AWG 相对强度法波长解调原理如图 4 所示, FBG 中心波长为 λ_{FBGm} , AWG 通道 n 和 AWG 通道 $n+1$ 对应的中心波长分别为 λ_n 和 λ_{n+1} , AWG Ch(n) 和 Ch($n+1$) 为 AWG 第 n 通道与第 $n+1$ 通道的透射谱波形. 阴影部分 P_n 和 P_{n+1} 为宽谱光源发射谱、FBG 反射谱和 AWG 对应输出通道透射谱三者乘积在整个光谱范围的积分, 即 AWG 相邻两通道的输出光功率. 当 FBG 的反射波长随外界温度或压力等的变化而发生漂

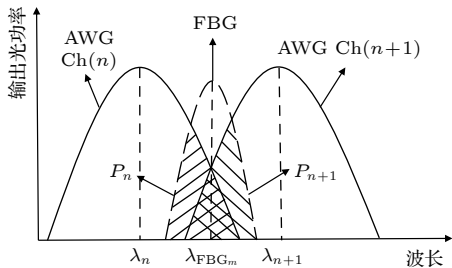


图 4 AWG 相对强度法波长解调原理图

Fig. 4. Wavelength interrogation principle of relative light intensity method using AWG.

移时, FBG 的反射谱与 AWG 相邻两通道透射谱叠加面积就会发生变化, 即 AWG 相邻两通道的输出光功率发生变化^[22,23]. 最后通过检测 AWG 相邻两通道的输出光功率变化, 根据光功率比对数与波长的关系即可解调出 FBG 传感器的波长偏移量.

AWG 波长解调系统中, AWG 通道 n 的透射谱函数和 FBG 的反射谱函数为

$$T_{\text{AWG}}(n, \lambda) = T_0 \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_n)^2}{\Delta \lambda_n^2} \right], \quad (1)$$

$$R_{\text{FBG}}(\lambda) = R_0 \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{\text{FBG}})^2}{\Delta \lambda_{\text{FBG}}^2} \right], \quad (2)$$

其中, T_0 为 AWG 传输谱的归一化因子, R_0 为 FBG 反射谱的归一化因子, λ 和 λ_n 为入射光波长和 AWG 通道 n 的中心波长, λ_{FBG} 为 FBG 的中心波长, $\Delta \lambda_n$ 为 AWG 通道 n 的半峰值带宽, $\Delta \lambda_{\text{FBG}}$ 为 FBG 半峰值带宽.

由 (1) 式和 (2) 式可得到通道 n 和通道 $n+1$ 输出光功率为

$$P_n = (1 - L_n) \int_0^\infty I_S(\lambda) R_{\text{FBG}}(\lambda) T_{\text{AWG}}(n, \lambda) d\lambda, \quad (3)$$

$$P_{n+1} = (1 - L_{n+1}) \int_0^\infty I_S(\lambda) R_{\text{FBG}}(\lambda) \times T_{\text{AWG}}(n+1, \lambda) d\lambda, \quad (4)$$

其中, L_n, L_{n+1} 为 $n, n+1$ 通道的损耗因子. 在同一个 AWG 中, 由于相邻通道损耗相差很小, 可假设 $L_n = L_{n+1} = L$. $I_S(\lambda)$ 为光源发射谱, 由 (1) 式和 (2) 式可知, P_n 和 P_{n+1} 主要由 λ_n 和 λ_{FBG} 决定, 对于宽谱光源光谱来说, $I_S(\lambda)$ 可视为一定值, 即 $I_S(\lambda) = I_S$. 设 AWG 通道间隔相同, 即 $\Delta \lambda = \lambda_{n+1} - \lambda_n$ 为常量.

假设同一 AWG 各通道传输系数、半峰值带宽相等, AWG 相邻两通道光功率比对数与 FBG 中心波长关系为

$$\ln \left(\frac{P_{n+1}}{P_n} \right) = \frac{8(\ln 2) \Delta \lambda}{\Delta \lambda_{\text{FBG}}^2 + \Delta \lambda_n^2} \lambda_{\text{FBG}} - \frac{4(\ln 2)(\lambda_{n+1}^2 + \lambda_n^2)}{\Delta \lambda_{\text{FBG}}^2 + \Delta \lambda_n^2}, \quad (5)$$

(5) 式即为 AWG 波长解调原理公式, 可以看出 AWG 相邻两通道输出光功率比对数与 FBG 反射波长呈线性关系. 只要能得到 AWG 相邻两通道的输出光功率, 便可利用 (5) 式解调出 FBG 的波长.

3 基于 AWG 的解调系统研究进展

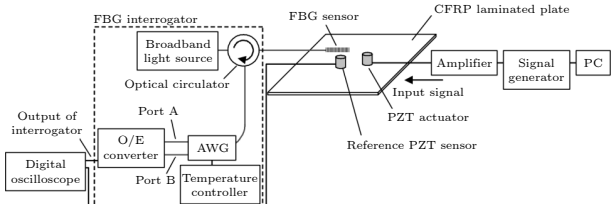
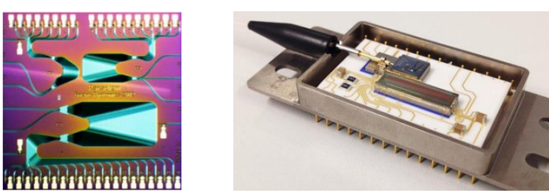
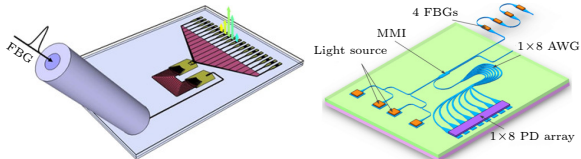
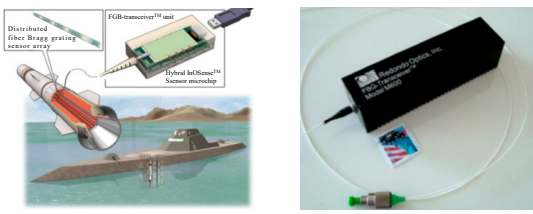
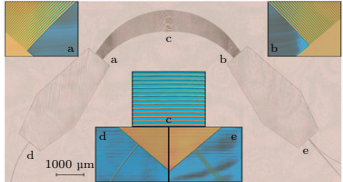
近年来, 新技术、新原理、新材料的不断出现, 特别是 PIC 技术飞速发展, 这为 FBG 波长解调系统的小型化发展奠定了基础. 基于 AWG 的 FBG 波长解调系统, 包括宽谱光源、环形器、滤波器、探测器等功能器件, 受功耗及封装体积限制, 传统分立光电子元件的集成化是未来发展的必然趋势. 基于 AWG 的 FBG 波长解调仪经历了分立组装、磷化铟 (InP) 单片集成、硅光子混合集成、二氧化硅 (SiO₂) 有源-无源混合集成及聚合物混合集成技术的发展过程, 如表 1 所列 [23–50].

3.1 分立器件组装

分立组装的 FBG 波长解调仪就是将宽带光源、FBG 传感器、AWG、探测器以及其他各光学器件分别封装好并通过光纤将各分立光学器件相连 [24–28]. 日本东京大学 Kojima 等 [24] 制作出可用于弹性波检测的高速光学波长解调仪, 通过实验证明了利用 AWG 光学滤波器可以将 FBG 传感器的波长漂移转换为输出功率变化, 无机械运动部件, 适用于高速检测. 此外, 它还具有灵敏度高、结构简单、多点测量等优点, 但目前分立组装的波长解调仪系统尺寸仍然很大. 该团队在后续研究中将此 FBG/压电混合传感系统应用于复合材料飞机结构健康监测 [24] 和液位监控 [26].

表 1 基于 AWG 的 FBG 波长解调系统研究进展

Table 1. Research progress of FBG wavelength interrogation system based on AWG.

研究进展	研究成果	特点
分立组装 ^[23-27]		系统尺寸仍然很大
InP单片集成 ^[28-33]		偏振相关性明显
SOI混合/单片集成 ^[34-40]		单偏振工作, 工艺容差很小
SiO ₂ 混合集成 ^[41-46]		器件尺寸相对较大, 但其他方面优势明显
聚合物混合集成 ^[47-50]		特殊应用, 成本较低

3.2 InP 单片集成

InP 材料作为直接带隙半导体材料,是目前为止能够真正意义上实现光源、无源波导、探测器单片集成的材料^[29–34]. Technobistft-fos 公司在 InP 平台上实现了一种特殊设计的 AWG^[30],该 AWG 具有光谱通道交叠大的特点,可用作光谱仪对波长复用 FBG 传感器进行解调. 该 AWG 在每个输出处单片集成一个光电探测器,并且利用 FBG 反射率和 AWG 信道透射率之间光谱重叠的功率分布,计算出波长偏移,可解调的动态范围为 4000 $\mu\epsilon$ (4.8 nm),波长分辨率为 5 pm. InP 材料能够实现光学系统包括光源、探测器、无源波导等的单片集成,但是,InP 材料具有一定的偏振相关性,需要特殊的外部偏振处理方可使用,增大了系统的复杂性.

3.3 硅基混合/单片集成

随着硅光子学的不断发展,硅锗探测器、硅基调制器、硅基无源光波导器件等硅光子单元器件被相继研发,硅基 FBG 波长解调仪也相继问世^[35–41]. 2009 年,武汉理工大学的 Wu 和 Liu^[35]设计了一种硅基 AWG 光纤光栅传感解调系统,采用改进的有限差分光束传播法进行计算,实验表明,该系统波长分辨率为 1 pm. 2014 年比利时根特大学 Trita 等^[36]开发并报道了一种基于绝缘体上硅材料 (silicon on insulator, SOI)AWG 的小型化解调仪,通过减小 AWG 的衍射级数实现其通道间大的光谱交叠,探测器以倒装焊的方式与 AWG 的输出耦合光栅进行耦合,光源采用了分立封装的超辐射二极管 (super luminescent diodes, SLD) 模块,并通过光纤与输入耦合光栅进行耦合,光子芯片的尺寸仅为 2.2 mm \times 1.5 mm. 测得该解调仪可解调的波段覆盖范围可达 40 nm,可以读出 8 个应变传感器及更多的温度传感器,其波长分辨率为 10 pm. 2015 年,该团队对 AWG 响应进行了优化^[37],使用质心探测技术,允许同时检测多个 FBG 峰值. 测得的解调仪分辨率为 2.5 pm,可解调范围为 50 nm,尺寸为 2.2 mm \times 1.5 mm. 2017 年,天津工业大学李鸿强等^[38]在 SOI 片上制作了输入/输出光栅耦合器、多模干涉耦合器、AWG 集成芯片,并将该芯片与 III-V 族垂直面发射激光器和探测器进行混合集成,首次实现了硅基混合集成 FBG 解调仪. 该解调仪光子芯片尺寸为 5 mm \times 3 mm,波长分

辨率为 1 pm,波长精度为 ± 10 pm. 2018 年,李鸿强等^[39]提出了一种超小型 AWG,其核心尺寸小于 530 μm \times 480 μm ,该 AWG 拥有良好的透射光谱和高偏振灵敏度,温度解调实验结果表明,基于超小型 AWG 的 FBG 解调系统在 10–50 $^{\circ}\text{C}$ 范围可实现高精度解调. 2020 年,他们又制作了 SOI-AWG 与 Ge/Si-PD 单片集成的解调光芯片^[40],促进了 FBG 解调系统小型化的研究,为硅基光子集成技术的进一步发展奠定了基础. 2021 年,北京信息科技大学 Weng 等^[41]制作了一种基于 SOI 的 8 通道 AWG,尺寸小于 335 μm \times 335 μm ,该 AWG 可以用于 FBG 解调系统,其动态范围为 1.2 nm,波长分辨率为 1.27 pm,精度为 20.6 pm. 实验结果表明,基于 SOI-AWG 光子集成技术的 FBG 解调系统具有良好的性能潜力,是 FBG 传感系统小型化的理想选择.

3.4 SiO₂ 混合集成

SiO₂ 材料成本低、制备工艺成熟、波导损耗低,并且 SiO₂ 波导与光纤耦合损耗极低、偏振相关性非常小,非常适合制作无源器件. 将 SiO₂ 平面光波回路型 (planar lightwave circuit, PLC) 滤波器、多模干涉仪等无源器件与 III-V 族半导体探测器芯片、光源等有源器件以及 A/D 处理单元等混合集成,可有效简化组装工序,且可实现多通道波长解调^[42–47]. Redondo 光学公司在 PLC 上实现了基于色散滤波器的 FBG 传感器解调系统^[42,47]. 这项技术通过使用硅基 SiO₂ 衬底作为光学工作台来实现有源和无源器件的混合集成,根据传感通道数的不同,器件封装尺寸从 18.5 mm \times 18.5 mm \times 50 mm 到 29 mm \times 29 mm \times 110 mm 不等. 该系统提供了高速动态解调,采样率高达 20 kHz,对于 1 个检测通道的动态范围为 10000 $\mu\epsilon$,对于 12 个检测通道,其单通道动态范围为 2500 $\mu\epsilon$. SiO₂ 基混合集成的 FBG 波长解调仪克服了分立系统复杂的组装,结构紧凑,功耗低,在目前技术水平下,也存在很大的竞争力.

3.5 聚合物混合集成

聚合物具有为多种应用提供新一代高性价比光学传感系统的巨大潜力^[48–51]. 爱尔兰都柏林理工学院 Ramakrishnan 等^[48]提出了一种小型化的柔性解调仪用于复合材料中的结构健康监测

(structural health monitoring, SHM), 其马赫-曾德尔干涉 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 电光器件和 AWG 以聚酰亚胺为衬底, 该材料足够柔韧和坚固, 并具有良好的热稳定性. 测得 1×6 通道的 AWG 串扰为 -34 dB, 插入损耗小于 10 dB. 2015 年, 德国克劳萨理工大学 Koch 等 [49] 制作了一种用于高达兆赫范围的高频测量的 FBG 解调仪, 在聚合物上制造了 13 通道, 400 GHz 的 AWG, 采样率为 2.5 MS/s, 将其用于码头起重机钢丝监测, 断线空间分辨率为 2.4 mm. 该团队于 2016 年研发了一种基于全聚合物 AWG 的 FBG 波长解调系统 [50], 2019 年将其用于电池监控. 他们所制备的 AWG 使用环烯烃聚合物作为衬底材料, 大大降低了材料成本、制造复杂性和后续处理的工作成本. 该装置在近红外中心波长 (850 nm) 范围内工作时外围元件如光源和探测器的成本较低, 所获得的精度可满足观察一个完整充电周期中单个电池的典型应变行为的基本要求, 该技术在未来的工作中还可以进行全聚合物传感器系统的研究, 对该领域的发展具有很大的促进作用.

3.6 不同材料平台 AWG 解调仪对比

由于不同材料体系固有的属性, 导致基于 AWG 的 FBG 波长解调仪具有不同的优缺点, 具体如表 2 所列.

其中, 硅光子 (Si/SOI 材料体系) 作为与互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺兼容的光电集成平台 [52], 是近年来各大研究机构及企业研究热点, 尤其是硅基各分立器件及集成器件的不断问世, 使其成为目前最具潜力与发展前景的阵列波导光栅 FBG 解调系统平台.

4 AWG 解调仪性能

AWG 作为 AWG 解调仪的关键器件, 在光学结构设计阶段需要考虑的关键参数有衍射级数、阵列波导数、自由传输区长度、输出波导间距等 [53], 进一步优化设计时还需考虑 3 dB 带宽、串扰、插入损耗和损耗均匀性等性能参数 [54]. 基于 AWG 的 FBG 解调仪的波长分辨率与动态范围、光谱响应带宽存在一定的关系, 如波导间距从 20 μm 增至 30 μm 时, 3 dB 带宽可减少约 50% [55], 波长分辨率提高, 但动态范围会缩小 [56]. 因此, 在不降低精度的前提下同时优化动态范围和波长分辨率, 是提高 AWG 解调仪性能的关键.

4.1 动态范围与波长分辨率

目前, 在基于 AWG 的 PIC 型 FBG 解调仪研究中, 存在的主要问题是解调系统动态范围及波长分辨率两性能参数相互制约, 不能同时达到最优. AWG 通道带宽的有限性决定了 FBG 解调系统动态范围及波长分辨率相互制约 [57], 即只能在小动态范围内达到高波长分辨率, 在大动态范围内的波长分辨率不高, 从而导致对温度、压力等参数的解调范围和分辨率有限.

为了提高解调仪性能, 第 1 种方法是对 AWG 透射谱进行针对性设计, 如减小 AWG 衍射级数实现大带宽, 增大相邻两通道透射谱的光谱交叠, 从而增大解调仪的动态范围. 传统的基于 AWG 光子集成技术的波长解调仪, 其解调分辨率与 3 dB 带宽有关. 增大 AWG 光谱的 3 dB 带宽, 在一定程度上能够拓宽 FBG 解调仪可测量的动态范围, 但解调函数曲线的斜率会随着带宽的增加而减小, 波长分辨率会有一定的降低, 如图 5 所示 [54]. 因此仅

表 2 不同衬底材料体系各自的优缺点以及主要应用场景

Table 2. Advantages and disadvantages of different substrates and their main application scenarios.

材料体系	优点	缺点	主要应用场景
SiO ₂	波导损耗低; 与光纤耦合损耗低; 偏振相关性低; 成本低; 制备工艺成熟稳定	弯曲半径大 (一般大于 1 mm); 器件尺寸较大 (大于几个 mm^2); 不能用来制备有源器件	主要用来制备无源波导器件, 如耦合器、分路器、滤波器、光开关等, 也可以实现无源与有源器件的混合集成
Si/SOI	制备工艺与 CMOS 兼容; 弯曲半径小 (可到 5 μm); 器件尺寸小	单偏振工作; 与光纤耦合损耗大; 制备工艺仍处于发展阶段	可制作无源器件, 利用其扩展材料体系 (III/V-Si, Ge-Si) 可实现有源、无源器件单片集成, 但目前混合集成占主导地位
InP	直接带隙半导体材料	偏振相关性明显; 工艺难度大	是制备光源、探测器等有源器件的理想成材率; 可真正意义上实现各种有源与无源器件的单片集成
聚合物	制造简单; 后续处理工作量大; 单位成本低	采样率较低; 光谱展宽和光学损耗方面性能较差	可用于制作无源器件, 如 AWG、耦合器、光纤光栅等; 便于实现全聚合物传感系统的搭建

仅依靠增大 AWG 通道带宽这一种方法, 上述规律不会被打破, 该方案是在动态范围与波长分辨率两性能之间的折中设计, 两者依然不能同时达到最优.

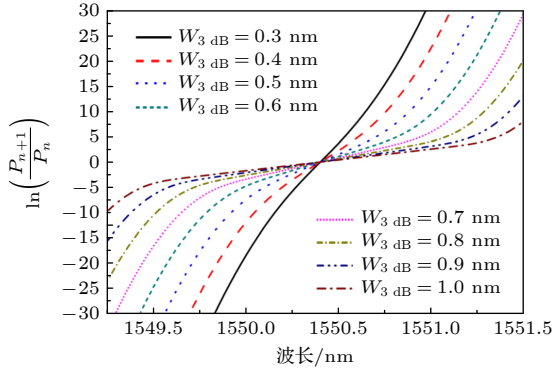


图 5 解调函数与 3 dB 带宽的关系 [54]

Fig. 5. Dependence of interrogation function on the 3 dB bandwidth of AWG ($W_{3\text{ dB}}$). [54].

第 2 种方法引入游标效应及时分复用技术 [58], 光学原理图见图 6, 系统硬件包括光分束器、光开关、AWG、PD 等. 光源发出的光经由 $1 \times M$ 的光分束器等功率分为 M 路, 每一路后接一个光开关, 并分别连接 AWG 的 M 路输入波导, 输入波导的信道间隔为 $\Delta\lambda_i$. AWG 的输出通道数为 N , 输出通道信道间隔为 $\Delta\lambda_o$, 在给定的任意时间里, 利用光开关, 仅有一个输入通道打开.

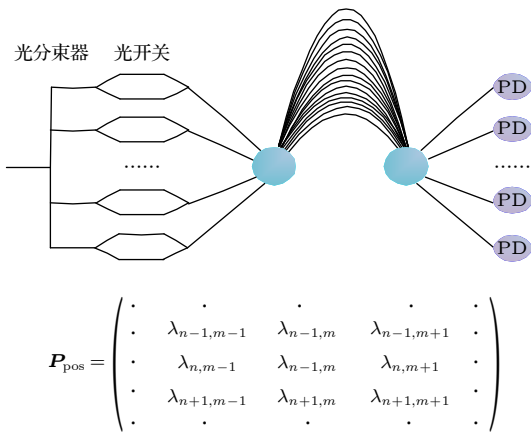


图 6 游标效应及时分复用技术的实现架构 [58]

Fig. 6. Implementation architecture of AWG-based FBGI based on vernier effect and time-division multiplexing technology [58].

考虑 AWG 信道的中心波长位置, 则 M 个输入和 N 个输出的不同组合可以表示为 $M \times N$ 矩阵 P_{pos} , P_{pos} 中的元素表示不同输入/输出信道组

合的峰值波长. 每一行代表同一输入波导输入时, 不同输出波导的峰值波长; 每一列代表不同输入波导输入时, 同一输出波导的峰值波长, 矩阵元素是从给定输入到给定输出的响应的峰值波长.

使用不同数量的输入通道数 M 和输出通道数 N (即 $M \neq N$), 且输入信道间隔与输出信道间隔不等 ($\Delta\lambda_i \neq \Delta\lambda_o$), 使得不同输入输出组合的所有峰值波长都不同. 如果能分别读出所有这些矩阵元素, 就能得到更多的光谱信息. 输入波导在空间上均匀分布, 且输入自由光谱区 (free spectral range, FSR) 与输出 FSR 相同, 即 $M \times \Delta\lambda_i = N \times \Delta\lambda_o$.

在常规的单输入 AWG 波长探测中, 通常只能从 AWG 相邻的两输出通道中采集两个光功率信号, 从而得出一个可测量的峰值波长信号. 利用光开关产生的时分复用技术以及不同输入/输出信道间隔产生的游标效应, 将能够收集到更密集的光谱信息, 对于任意波长的 FBG 反射光, 可以从 N 个光电探测器中提取 $M \times N$ 信号. 当 FBG 反射光处于边缘波长时, 依然可以得到高质量的解调函数值, 实现其高波长分辨率解调. 因为在光谱的每个部分都有多个通道处于活动状态, 校准数据的波长位置是通过对系统的全面表征获得的. 图 7 表示在 AWG 通道 1 输入的情况下, 并不能得到有效的波长解调信息, 但当在 AWG 通道 4 输入的情况下, 可以实现 FBG 波长信号的精确解调 [53].

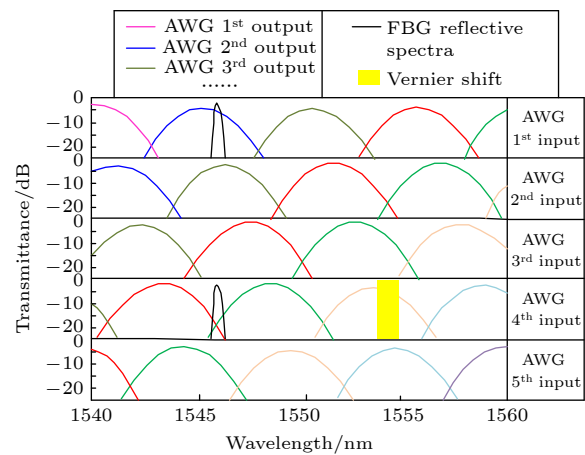


图 7 基于游标效应及时分复用技术的高精度波长解调实现方法 [53]

Fig. 7. Realization of high-precision wavelength interrogation based on vernier effect and time-division multiplexing technology [53].

第 3 种方法 [31,59] 是通过在输入波导插入 1×2 MMI 耦合器 (见图 8(a)) 并将其输出 (图 8(b)) 中

的 α 和 β) 连接到 AWG 的星形耦合器, 实现修改输入波导目的, 使得每个探测器的光谱响应中增加第 2 个峰值, 峰值的位置可以由波导 α 和 β 之间的距离控制. 在该设计中, 这个距离对应于光谱响应的 $2.5 \times \Delta f_{\text{ch}}$, 因此至少在两个探测器上可以读出任意波长.

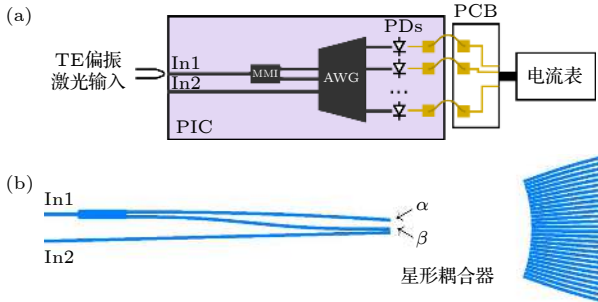


图 8 修改输入波导后的 FBG 波长解调系统 (a) 基于 AWG 的解调仪原理图; (b) AWG 输入的设计^[31]

Fig. 8. FBG wavelength interrogation system with modified input waveguide: (a) Schematic of the AWG-based interrogator; (b) design of AWG inputs^[31].

图 9(a) 所示为输入经修改后, AWG 4-8 通道的输出谱^[31]. 每个输出在通带中有两个峰值 (α , β), 它们之间的间隔 $\Delta\lambda_{\alpha,\beta}$ 由图 8 中输入 α 和 β 之间的距离决定, 在所设计的器件中, $\Delta\lambda_{\alpha,\beta} = 2.5\Delta\lambda_{\text{ch}}$. 该方案对 AWG 模拟中心波长 λ_0 进行了校正, 使其与被测通带的位置相匹配.

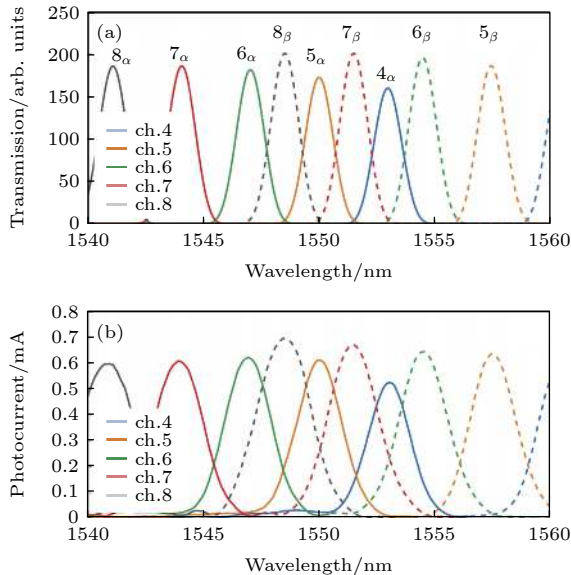


图 9 AWG 传输谱 (仅显示 4—8 通道) (a) 模拟波长响应; (b) 测量响应^[31]

Fig. 9. Modified AWG passbands, where only channels 4–8 are shown: (a) Simulated wavelength response; (b) measured wavelength response^[31].

图 9 中不同通道用不同颜色显示, 实线和虚线分别代表 α 和 β 峰值, a 为模拟波长响应, b 为测量响应. 该方案使得至少有两个探测器在任何波长都有明显的测量信号. 因此, 在保持器件面积小的同时, 提高了测量分辨率. 该方案证明了在 10 nm 工作范围内测量的分辨率为 0.32 pm, 相对分辨率高达 0.003%, 是光子集成解调仪迄今为止最佳分辨率.

通过以上 3 种方法可改善基于 AWG 的 FBG 波长解调仪中存在的波长分辨率与动态范围相互制约的问题, 使解调系统的解调性能实现优化.

4.2 解调精度

解调精度是检验基于 AWG 的 FBG 解调仪解调性能的重要指标之一. 现有研究通过对解调系统中不同器件的改进提出了多种提高解调精度的方法, 第 1 种方法通过使用刻在光纤相同位置的两个反射峰值波长有微小差异的 FBG 来替代原先的一个 FBG, 与具有相同频谱带宽和 AWG 信道数量的单个 FBG 系统相比, 可以有效降低误差^[60], 提高灵敏度^[61]. 第 2 种方法通过使用温度调谐对 AWG 进行波长扫描^[62], 以生成一个带有校准数据的查找表, 在波长域内预先模拟传感器响应, 可以显著提高系统线性度, 实验表明, 测量误差的绝对值分别从 120 $\mu\epsilon$ 或 15 $^{\circ}\text{C}$ 降低到 4.8 $\mu\epsilon$ 或 0.6 $^{\circ}\text{C}$ ^[63]. 第 3 种方法是通过替换 AWG 解调仪中的其他器件提高解调精度, 例如利用闭环压电马达控制沿着 AWG 输入耦合器的光束位置, 由于光束位置和 AWG 信道的传输波长之间的存在固定关系, 可以实现对 FBG 波长的精确解调^[64]. 或者利用半导体环形激光器耦合的 AWG 模块对 FBG 应变传感器进行解调, 由于半导体环形激光器的高信噪比和稳定输出的特性, 当 FBG 在高频下受到动态微应变时, 具有良好的响应^[65].

此外, 使用信道间隔更密集的 AWG 可以提高解调系统的线性度, 在 AWG 的设计中可以通过适当选择最小阵列波导长度获得窄带谱响应 AWG^[66].

典型的基于 AWG 光子集成技术的波长解调仪解调性能对比如表 3 所列.

5 典型应用

5.1 结构健康监测

2004 年, 加拿大国家研究理事会 Xiao 等^[43,45]

表 3 基于 AWG 光子集成技术的波长解调仪指标对比

Table 3. Performance comparisons of FBGs based on AWG-PIC technology with different substrates.

技术方案	材料体系	动态范围	采样率	光源输出功率	波长分辨率	复用能力
色散滤波器或AWG的波分复用技术 ^[42,47]	SiO ₂	≤10000 με (1 FBG); ≤2500 με (12 FBG)	2 kHz (1 FBG); 20 kHz (5 FBG)	<5 dBm	±5 pm@ 100 Hz	色散滤波器: <12 FBG; AWG: >12
单片集成AWG光谱分析技术 ^[30]	InP	4000 με/4.8 nm (8 FBG)	19.2 kHz	外部光源: 5 mW (FBG反射率>90%)	5 pm	单通道: 8 FBG
混合集成AWG光谱分析技术 ^[38]	SOI	5—80 °C	2 kHz	0.8 mW (−1 dBm)	±10 pm	波分复用: 8通道AWG实现4 FBG解调
混合集成AWG光谱分析技术 ^[51]	聚合物	3.0—4.2 V	2 Hz	6 mW (FBG反射率 为90%)	1 pm	3通道AWG实现 1 FBG解调

提出通过热调谐 AWG 对 FBG 波长进行解调, 2005 年研发出可应用于航空航天结构和土木工程的健康监测以及环境监测的 FBG 解调仪^[44,46], 该解调仪使用 AWG 作为解复用器可同时解调多个 FBG, AWG 尺寸为 35 mm × 55 mm, 探测器阵列芯片尺寸为 35 mm × 10 mm, 具有质量轻和体积小的优势, 分辨率优于 1 pm, 相当于为温度和应变监测分别提供 0.1 °C 和 1 με 的系统分辨率. 2012 年, 该团队^[67]研发了用于飞行器结构健康监测的小型化 FBG 解调仪, 用于 FBG 传感解调的 AWG 芯片如图 10 所示, 其所提出的基于可编程逻辑控制器的双功能解调单元可同时用于运行载荷监测和冲击损伤检测. 2012 年, 华南师范大学 Su 和 Huang^[68]为实现结构健康监测, 在其 2007 年的解调系统上进行改良, 提出了一种基于 AWG 的双通道准分布式 FBG 解调仪, 该系统不受光源功率波动、光源光谱不均匀以及微弯曲引起的 FBG 衰减的影响^[69].

图 10 用于 FBG 传感解调的 AWG 芯片^[67]

Fig. 10. An illustration of the AWG chip used for FBG sensor interrogation^[67].

5.2 电压和电流监控

2004 年, 英国格拉斯哥大学 Niewczas 等^[70]对基于 AWG 的 FBG 解调系统进行了性能分析, 该系统使用 16 通道、100 GHz 的 AWG, 使得分辨率在 1.2 pm 以下. 2007 年, 该团队^[71,72]首次提出

利用 AWG 解调仪对混合光纤电压和电流传感器(见图 11)进行解调, 实验表明, 该系统能够测量电压和电流波形的可变频率, 适用于飞机电气系统中的电压和电流监控, 还可用于电压和电流谐波分析以及电能质量测量.

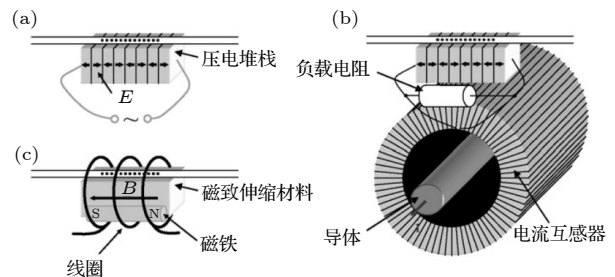


图 11 (a) 混合电压传感器; (b) 采用电压传感器和电流互感器的电流传感器; (c) 磁致伸缩电流传感器^[72]

Fig. 11. (a) Hybrid voltage sensor; (b) current sensor employing a voltage sensor and a current transformer; (c) magnetostrictive current sensor^[72].

5.3 磁共振成像监测

2021 年, 波兰华沙理工大学 Kaźmierczak 等提出了一种基于 PIC 的 FBG 解调仪, 专用于在磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 扫描下监测患者基本生命体征, 该系统核心器件为 36 通道的 AWG^[33,34]. MRI 监测系统如图 12 所示,

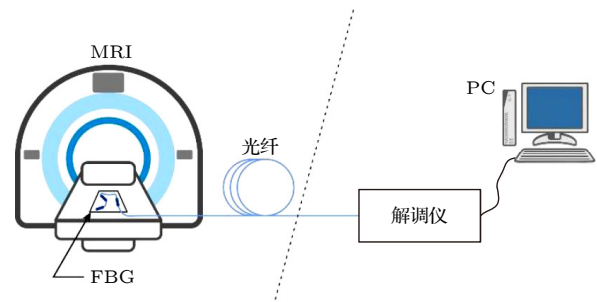
图 12 MRI 监测系统^[34]

Fig. 12. MRI monitoring system^[34].

解调仪具有足够的时间分辨率跟踪呼吸速度并精确区分各个呼吸,适用于各个场景,如重症监护室、疗养院或私人住宅等的睡眠质量检测,防止睡眠呼吸暂停事件,但心率监测功能暂未实现,需要在目前基础上增加采样率和升级检测算法。

5.4 其他应用

AWG 被广泛应用于对 FBG 应变和温度传感的解调. 2006 年, 英国赫里奥特-瓦特大学的 Fender 等^[73]描述了 AWG 在动态应变测量光纤光栅解调中的应用, 并将这一技术推广到测量多芯光纤中两个 FBG 对之间的动态微应变, 光纤曲率分辨率为 0.05 m^{-1} . 2013 年, 该团队^[74]又设计了用于动态应变测量的解调系统, 其分辨率为 $1.4 \text{ }\mu\text{m}$. 2021 年, 意大利那不勒斯费德里科二世大学的 Marrazzo 等^[75]提出了一种可进行高频测量的无源 FBG 解调系统, 采用高频应变应力和粘贴在铝板上的 FBG 对系统进行了测试, 验证了系统的可行性, 成功检测到 100 Hz 和兆赫兹范围内的 FBG 振动。

2008 年, 华南师范大学 Huang 等^[76]提出了一种低成本、高分辨率的波长检测器, 其利用非对称 AWG 和一维位置敏感探测器 (position sensitive detector, PSD) 相结合, 该装置可应用于对温度分辨率为 $0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 FBG 温度传感器的解调. 2019 年, 韩国川南国立大学 Moon 等^[77]为温度测量开发了一种基于 AWG 的 FBG 解调系统, 图 13 为其实验装置示意图, 该系统配备了 50 kHz , 96 通道的 AWG, 并使用环氧树脂对 0.3 nm 带宽的 FBG 传感器进行了封装, 动态范围为 $25\text{--}85 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 分辨率为 $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

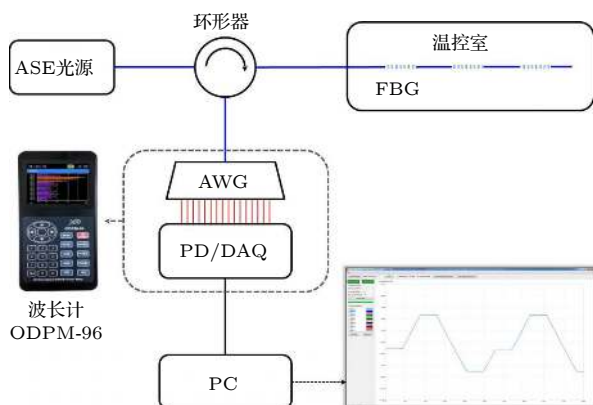


图 13 实验装置示意图^[77]

Fig. 13. A schematic diagram for experimental set-up^[77].

此外, AWG 还可用于对 FBG 麦克风阵列解调. 2007 年, 日本东京工业大学 Nakamura 等^[78]利用 AWG 解调仪对 FBG 麦克风阵列进行了解调, 利用 32 通道 100 GHz 的 AWG 研究了声音信号的解调特性, 实验装置如图 14 所示, 但为了实际应用, 还需提高单元麦克风的性能。

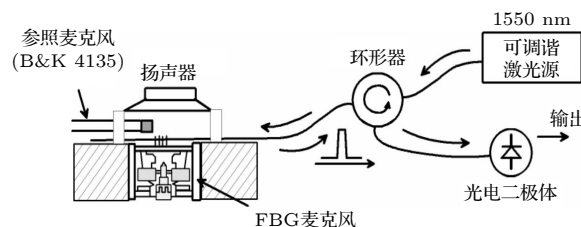


图 14 用于评估 FBG 麦克风的实验装置^[78]

Fig. 14. Experimental setup for evaluating the FBG microphone^[78].

综上所述, 国内外对基于 AWG 的 FBG 解调技术的研究做出了一定的成果, 研制出一系列的小型 FBG 解调仪, 并成功将其应用到结构健康监测、电压和电流监控、磁共振成像监测等领域. 利用 AWG 进行解调具有小型化、高精度、高速率等优势, 在后续研究中可继续对实现其体积更小, 精度更高等要求进行研究, 以将该技术推广至更广泛的应用领域。

6 未来发展

6.1 新材料

硅材料^[79]是一种良好的光学材料, 被广泛应用于 AWG 解调芯片的制备中, 但由于硅材料属于间接带隙半导体材料, 因此发光效率低, 需要借助混合集成技术解决片上光源和光放大等难题. 目前, 通过倒焊芯片和晶圆键合技术可以实现混合集成, 而且技术比较成熟, 但相比单片解决方案而言, 混合集成技术在将来的大规模生产需求中则显得不占优势, 因此, 单片集成技术也是未来的重点研究内容. 事实上, 金属有机化合物化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MO CVD) 异质外延技术和分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 技术可以在硅基上实现材料的直接生长, 硅基与锗材料的结合已有进展^[80]. 理论上可以利用异质外延技术研究并生产一种新的材料体系^[81,82], 即硅基与 III-V 族 (InP 和 GaAs) 相

结合的材料体系,但由于 InP, GaAs 和 Si 之间存在巨大的晶格失配, InP, GaAs 材料在硅基上直接异质外延还需要进行深入的实验研究. 如果能够突破这一难题,未来有望制造出单片集成的全光芯片.

6.2 系统集成

基于 AWG 的 FBG 解调系统正在往小型化、低能耗、高精度、高速率等方面进行探索研究,其主要由光学模块和电学模块两部分组成,目前所研发出的较小型解调仪是将光芯片与电路相连组成系统,但是仪器尺寸无法达到理想水平,因此,在保证解调系统整体性能不变的前提下来替换或删减元器件以减小仪器尺寸(系统最大集成化)是当前 AWG 解调系统急需解决的问题.

提高解调系统集成度的重点在增强光电子融合芯片的架构设计能力,加强光电子融合芯片的工艺能力和基础积累,建立适合大规模光电集成芯片的组件库,提高光电子融合芯片的封装和调控技术. 在可预见的未来,不仅能将各类光器件集成到同一光芯片上,还可以考虑将整个解调系统所需电子元件甚至微电子集成电路在同一芯片上实现高度集成,真正实现解调仪的小型化,以适应更高水平的应用需求.

6.3 规模化

实现基于 AWG 的 FBG 解调仪的商用化,关键在于需要拥有超大规模的制造能力,但目前存在的主要问题有两点:第一,该项技术的性价比不明显,因此大规模商用存在阻碍;第二,用于微电子 CMOS 工艺虽然很成熟,但如果要将 CMOS 工艺复用到 AWG 光芯片的加工上,则需要重新调整参数,定制工艺流程,存在难以复用的问题. 生产成本和制作工艺问题的解决,将有利于促进基于 AWG 的 FBG 解调仪的大规模商业化生产,从而实现诸如导弹、卫星等更多的领域的应用.

7 总 结

基于 AWG 的 FBG 波长解调技术以其独特优势特别适用于对应变、温度有很高要求的解调场合,同时也具备极限环境下的对监测信号实时解调的潜力. 近 20 年来,国内外研究人员从解调方法、

材料体系、解调性能和应用等方面开展了 AWG 解调的研究工作,取得了一定的进展. 本文梳理了基于 AWG 的 FBG 波长解调技术的发展历程,分析了 AWG 解调仪的材料体系及工艺、系统性能和典型应用,指出了当前存在的关键问题即解调系统动态范围及波长分辨率两性能参数相互制约,并结合新材料、集成度、规模化探讨了未来发展方向. 本文可为 AWG 光子集成解调技术的研究发展提供参考.

参考文献

- [1] Culshaw B, Kersey A 2008 *J. Light. Technol.* **26** 1064
- [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, LeBlanc M, Koo K P, Askins C G, Putnam M A, Friebele E J 1997 *J. Light. Technol.* **15** 1442
- [3] Wang T, Liu K, Jiang J F, Xue M, Chang P X, Liu T G 2017 *Opt. Express* **25** 14900
- [4] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W 1993 *Opt. Lett.* **18** 1370
- [5] Yuan L B 2004 *Opt. Laser. Technol.* **36** 365
- [6] Fukuma N, Nakamura K, Ueha S 2005 *Proceedings of 17th International Conference on Optical Fibre Sensors Bruges, Belgium, May 23, 2005* p852
- [7] Wu K T, Zhang J H, Zhang W L 2018 *Sci. Technol. Inf.* **16** 106 (in Chinese) [吴开拓, 张继华, 张万里 2018 科技资讯 **16** 106]
- [8] Marin Y E, Nannipieri T, Oton C J, Pasquale F D 2018 *J. Light. Technol.* **36** 946
- [9] Marin Y E, Nannipieri T, Oton C J, Pasquale F D 2017 *Proceedings of the 25th International Conference on Optical Fiber Sensors Jeju, Korea, April 23, 2017* p10323
- [10] Wang L P, Ren C, Cao D Z, Lan R J, Kang F 2021 *Chin. Phys. B* **30** 064209
- [11] Zhang W F, Yao J P 2020 *Nat. Commun.* **11** 406
- [12] Theurer M, Moehrle M, Sigmund A, Velthaus K O, Oldenbeuving R M, Wevers L, Postma F M, Mateman R, Schreuder F, Geskus D, Worhoff K, Dekker R, Heideman R G, Schell M 2020 *J. Light. Technol.* **38** 2630
- [13] Lu Z Q, Han Q, Ye H, Wang S, Xiao F, Xiao F 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 208501 (in Chinese) [陆子晴, 韩勤, 叶焱, 王帅, 肖峰, 肖帆 2021 物理学报 **70** 208501]
- [14] Ma C S, Qin Z K, Zhang D M 2012 *Design and Simulation of Optical Waveguide Devices* (Beijing: Higher Education Press) pp134, 135 (in Chinese) [马春生, 秦政坤, 张大明 2012 光波导器件设计与模拟 (北京: 高等教育出版社) 第134, 135页]
- [15] Li H Q, An Z X, Zhang S, Zuo S S, Zhu W, Zhang S S, Huang B J, Cao L, Zhang C, Zhang Z Y, Song W C, Mao Q H, Mu Y X, Miao C Y, Li E B, Garcia J D P 2021 *ACS Photonics.* **8** 3607
- [16] Webb D J, Pechstedt R D 2002 *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest* Portland, OR, USA, May 10, 2002 p569
- [17] Norman D C C, Webb D J, Pechstedt R D 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 691
- [18] Norman D C C, Webb D J, Pechstedt R D 2004 *Proceedings of the Optical Sensing* Strasbourg, France, September 1, 2004 p101

- [19] Li H Q, Wang R J, Zhang M L, Gao Q, Zhang S, Song W C, Mao Q H, Li E B, Garcia J D P 2021 *J Appl. Opt.* **42** 898 (in Chinese) [李鸿强, 王润洁, 张美玲, 高倩, 张赛, 宋文超, 毛泉桦, 李恩邦, Garcia Juan Daniel Prades 2021 *应用光学* **42** 898]
- [20] Sano Y, Yoshino T 2003 *J. Light. Technol.* **21** 132
- [21] Sano Y, Hirayama N, Yoshino T 2003 *Proceedings of the Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies VII* San Jose, CA, United States, June 19, 2003 p197
- [22] Cheng R, Xia L 2016 *Opt. Lett.* **41** p5254
- [23] Buck T C, Müller M S, Plattner M, Koch A W 2009 *Proceedings of the Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI* Munich, Germany, June 17, 2009 p738930
- [24] Kojima S, Hongo A, Komatsuzaki S, Takeda N 2004 *Proceedings of the Smart Structures and Materials 2004: Smart Sensor Technology and Measurement Systems* San Diego, CA, United States, July 27, 2004 p241
- [25] Komatsuzaki S, Kojima S, Hongo A, Takeda N, Sakurai T 2005 *Proceedings of the Smart Structures and Materials 2005: Smart Sensor Technology and Measurement Systems* San Diego, California, United States, May 16, 2005 p54
- [26] Hongo A, Kojima S, Komatsuzaki S 2005 *Struct. Control. Health. Monit.* **12** 269
- [27] Komatsuzaki S, Kojima S, Hongo A, Takeda N, Sakurai T 2006 *Proceedings of the Smart Structures and Materials 2006: Smart Sensor Monitoring Systems and Applications* San Diego, California, United States, March 30, 2006 p616703
- [28] Komatsuzaki S, Kojima S, Hongo A, Takeda N, Sakurai T 2007 *Proceedings of the Sensor Systems and Networks: Phenomena, Technology, and Applications for NDE and Health Monitoring* San Diego, California, United States, April 10, 2007 p653000
- [29] Xiao G Z, Sun F G, Zhang Z Y, Lu Z G, Liu J R, Wu F, Mrad N, Albert J 2007 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **49** 668
- [30] Evenblij R S, Leijtens J A P 2017 *International Conference on Space Optics—ICSO La Caleta, Tenerife, Canary Islands, October 7–10, 2014* p105631A
- [31] Pustakhod D, Kleijn E, Williams K, Leijtens X 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 2203
- [32] Kaźmierczak A, Jusza A, Slowikowski M, Stopiński S, Piramidowicz R 2018 *Proceedings of the Optical Sensing and Detection V* Strasbourg, France, May 9, 2018 p106800M
- [33] Kaźmierczak A, Slowikowski M, Osuch T, Stopiński S, Piramidowicz R 2019 *The European Conference on Lasers and Electro-Optics* Munich, Germany, June 23–27, 2019 p34
- [34] Slowikowski M, Kaźmierczak A, Stopiński S, Bieniek M, Szostak S, Matuk K, Augustin L, Piramidowicz R 2021 *Sensors* **21** 4238
- [35] Wu W, Liu X 2009 *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition* Shanghai, China, November 2–6, 2009 p76302D
- [36] Trita A, Vickers G, Mayordomo I, van Thourhout D V, Vermeiren J 2014 *Proceedings of the Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits IV* Brussels, Belgium, May 8, 2014 p91330D
- [37] Trita A, Voet E, Vermeiren J, Delbeke D, Dumon P, Pathak S, Van Thourhout D 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 1
- [38] Li H Q, Ma X D, Cui B B, Wang Y X, Zhang C, Zhao J F, Zhang Z Y, Tang C X, Li E 2017 *Optica* **4** 692
- [39] Li H Q, Xie R, Hong Y H, Zhang Z Y, Zhang C, Tang C X, Li E B 2018 *Opt. Eng.* **57** 065103
- [40] Li H Q, Zhang S, Zhang Z, Zuo S, Zhang S S, Sun Y Q, Zhao D, Zhang Z Y 2020 *Nanomaterials* **10** 1683
- [41] Weng S M, Yuan P, Zhuang W, Zhang D L, Luo F, Zhu L Q 2021 *Photonics* **8** 214
- [42] Mendoza E A, Esterkin Y, Kempen C, Sun S J 2010 *Proceedings of the Photonics in the Transportation Industry: Auto to Aerospace III* Orlando, Florida, United States, April 29, 2010 p76750S
- [43] Xiao G Z, Zhao P, Sun F G, Lu Z G, Zhang Z, Grover C P 2004 *Opt. Lett.* **29** 2222
- [44] Mrad N, Xiao G Z 2005 *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems* Banff, Alberta, Canada, July 24–27, 2005 p359
- [45] Xiao G Z, Zhao P, Sun F G, Lu Z G, Zhang Z Y 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1710
- [46] Xiao G Z, Sun F G, Lu Z G, Zhang Z Y 2005 *Fourth IEEE Conference on Sensors* Irvine, CA, United States October 31–November 3, 2005 p1104
- [47] Mendoza E A, Esterkin Y, Kempen C, Sun Z J 2011 *Photonic Sens.* **1** 281
- [48] Ramakrishnan M, Rajan G, Semenova Y, Wolinski T, Domański A, Farrell G 2014 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **56** 1167
- [49] Koch J, Angelmahr M, Schade W 2015 *Proceedings of the Fiber Optic Sensors and Applications XII* Baltimore, Maryland, United States, May 13, 2015 p94800Y
- [50] Orghici R, Bethmann K, Zywiets U, Reinhardt C, Schade W 2016 *Opt. Lett.* **41** 3940
- [51] Meyer J, Nedjalkov A, Pichler E, Kelb C, Schade W 2019 *Batteries* **5** 66
- [52] Lu L D, Zhu L Q, Zeng Z M, Cui Y P, Zhang D L, Yuan P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 034204 (in Chinese) [鹿利单, 祝连庆, 曾周末, 崔一平, 张东亮, 袁配 2021 *物理学报* **70** 034204]
- [53] Ji S K, Li K, Yuan P, Sun G K, Lu L D, Meng F Y, Lu Y X, Zhu L Q 2021 *Opt. Laser. Technol.* **149** 107372
- [54] Yuan P, Weng S M, Ji S K, Zhang D L, Zhu L Q 2021 *Opt. Eng.* **60** 066101
- [55] Sun F G, Xiao G Z, Zhang Z Y, Lu Z G 2007 *Opt. Commun.* **271** 105
- [56] Liu Z M, Li J 2010 *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* Wuhan, China, March 6–7, 2010 p335
- [57] Marrazzo V R, Riccio M, Maresca L, Irace A, Breglio G 2019 *15th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics* Lausanne, Switzerland, July 15–18, 2019 p149
- [58] Ruocco A, Van Thourhout D, Bogaerts W 2014 *J. Light. Technol.* **32** 3351
- [59] D'Agostino D, Desbordes T, Broeke R, Boerkamp M, Mink J, Ambrosius H P M M, Smit M K 2014 *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics* San Diego, CA, United States, July 13–17, 2014 p IM2A.4
- [60] Robertson D, Niewczas P, McDonald J R 2005 *Proceedings of the 17th International Conference on Optical Fibre Sensors* Bruges, Belgium, May 23, 2005 p844
- [61] Norman D C C, Webb D J, Pechstedt R D 2003 *Electron. Lett.* **39** 1714
- [62] George D S, Hill S, Howden R I, Smith G W 2009 *Proceedings of the 20th International Conference on Optical Fibre Sensors* Edinburgh, United Kingdom, October 5, 2009 p75031W
- [63] Fusiek G, Niewczas P, Willshire A J, McDonald J R 2008 *IEEE T. Instrum. Meas.* **57** 2528
- [64] Guo H L, Xiao G Z, Mrad N, Albert J, Yao J P 2010 *J. Light. Technol.* **28** 2654
- [65] Zhang J, Tao C Y, Xiao J J, Zhao Y, Jiang X H 2021

- Proceedings of the Health Monitoring of Structural and Biological Systems XV* Online Only, March 22, 2021 p115930D
- [66] Sun F G, Xiao G Z, Lu Z G, Zhang Z Y, Zhou M, Liu J R 2005 *Frontiers in Optics* Tucson, AZ, United States, October 16–21, 2005 FThY5
- [67] Guo H L, Xiao G Z, Mrad N, Yao J P 2012 *Photonic Sensing: Principles and Applications for Safety and Security Monitoring* (New York: John Wiley and Sons) 183
- [68] Su H, Huang X G 2007 *Opt. Commun.* **275** 196
- [69] Chen L X, Xu W, Huang X G 2012 *Appl. Mech. Mater.* **226** 2062
- [70] Niewczas P, Willshire A J, Dziuda L, McDonald J R 2004 *IEEE T. Instrum. Meas.* **53** 1192
- [71] Fusiek G, Niewczas P, McDonald J R 2007 *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007* Warsaw, Poland, May 1–3, 2007 p1
- [72] Fusiek G, Niewczas P, McDonald J R 2008 *Sens. Actuator A Phys.* **147** 177
- [73] Fender A, Rigg E J, Maier R R J, MacPherson W N, Barton J S, Moore A J, Jones J D C, Zhao D, Zhang L, Bennion I, McCulloch S, Jones B J S 2006 *Appl. Opt.* **45** 9041
- [74] John R N, Read I, MacPherson W N 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 075203
- [75] Marrazzo V R, Fienga F, Riccio M, Irace A, Breglio G 2021 *Sensors* **21** 6214
- [76] Huang J T, Huang X G, Zhao H W 2008 *J. Mod. Opt.* **55** 2981
- [77] Moon H M, Kwak S C, Im K, Kim J B, Kim S 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 2598
- [78] Nakamura K, Fujisue T, Ueha S 2007 *Proceedings of the Fiber Optic Sensors and Applications V* Boston, MA, United States, October 12, 2007 p677006
- [79] Zhang N, Xu K K, Chen Y X, Zhu K F, Zhao J M, Yu Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 167803 (in Chinese) [张宁, 徐开凯, 陈彦旭, 朱坤峰, 赵建明, 于奇 2019 物理学报 **68** 167803]
- [80] Zhang J Y, Gao F, Zhang J J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 217802 (in Chinese) [张结印, 高飞, 张建军 2021 物理学报 **70** 217802]
- [81] Megalini L, Suran Brunelli S T, Charles W O, Taylor A, Isaac B, Bowers J E, Klamkin J 2018 *Materials* **11** 337
- [82] Volet N, Spott A, Stanton E J, Davenport M L, Chang L, Peters J D, Briles T C, Vurgaftman I, Meyer J R, Bowers J E 2017 *Laser Photonics Rev.* **11** 1600165

REVIEW

Review of fiber Bragg grating interrogation techniques based on array waveguide gratings*

Li Ke¹⁾²⁾ Dong Ming-Li^{1)3)†} Yuan Pei¹⁾²⁾ Lu Li-Dan¹⁾²⁾
 Sun Guang-Kai¹⁾²⁾ Zhu Lian-Qing^{1)2)‡}

1) (*Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China*)

2) (*Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China*)

3) (*Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China*)

(Received 7 November 2021; revised manuscript received 10 January 2022)

Abstract

The photonic integrated interrogation technology based on array waveguide grating is a hot but difficult research area in the silicon optical field. Compared with traditional interrogation methods, the photonic integration interrogation technology based on an array waveguide grating has obvious advantages in high-speed and high-precision demodulation of fiber Bragg gratings due to its high demodulation accuracy, fast demodulation speed, and small package size. In recent years, with the development of photonic integration technology, various research institutions and relevant organizations have conducted extensive and in-depth research and optimization on the photonic integration interrogation method of array waveguide gratings. In this paper we introduce the working principle of array waveguide grating and the principle of fiber Bragg grating wavelength interrogation based on array waveguide grating, the important progress of fiber Bragg grating interrogator based on array waveguide grating in both material system and system performance, and summarize the typical applications in interrogator based on array waveguide grating. The future development of fiber Bragg grating demodulation system is proposed from three aspects: new materials, system integration, and scale-up, which provides a reference for the research and development of photonic integrated interrogation technology based on array waveguide grating.

Keywords: fiber Bragg gratings, wavelength demodulation, arrayed waveguide grating, photonic integrated circuit

PACS: 42.81.Qb, 42.70.-a, 42.82.-m, 42.82.Gw

DOI: 10.7498/aps.71.20212063

* Project supported by the 111 Project of China (Grant No. D17021), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51705024), and the Key Project of Beijing Municipal Education Commission Science and Technology Program (Grant No. KZ201911232044).

† Corresponding author. E-mail: dongml@bistu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: lqzhu_bistu@sina.com