光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023091205

用于 FBG 解调的 AWG 芯片的设计、仿真与制备

李姝锋[1,2]，袁　配[1,2*]，黎　婷[1,2]，李丙祥[1,2]，许　然[1,2]，杨奕瑶[1,2]，祝连庆[1,2]

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室；2. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016）

摘　要： 设计、仿真并制备了一种用于光纤布拉格光栅（FBG）解调的阵列波导光栅（AWG）芯片。该芯片基于 SOI 衬底进行制备，并在 AWG 的输入/输出波导、阵列波导与平板波导之间采用双刻蚀结构进行优化。经仿真，该 AWG 的插入损耗为 1.5 dB，串扰小于 －20 dB，3 dB 带宽为 1.5 nm。优化后的 AWG 芯片采用深紫外光刻技术、电感耦合等离子体等技术制备。经测试，该 AWG 的插入损耗为 3 dB，串扰小于 －20 dB，3 dB 带宽为 2.3 nm。搭建了基于该 AWG 的解调系统，解调实验结果表明，该系统在 0.8 nm 范围内的解调精度可达 11.26 pm，波长分辨率为 6 pm。

关键词： 阵列波导光栅；绝缘体上硅；光纤传感；光纤光栅解调系统；光子集成

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0069－05

Design, Simulation and Fabrication of AWG Chip for FBG Demodulation

LI Shufeng[1,2], YUAN Pei[1,2], LI Ting[1,2], LI Bingxiang[1,2], XU Ran[1,2], YANG Yiyao[1,2], ZHU Lianqing[1,2]

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN)

Abstract: The miniaturized fiber Bragg grating (FBG) demodulation system is a hot research topic in the field of fiber optics sensing. The development of photonic integration technology has given rise to a series of compact FBG demodulation devices. Arrayed waveguide gratings (AWGs) serve as the core components in photonic integrated demodulation systems. Their spectral characteristics have a significant impact on the demodulation performance of photonic integrated FBG demodulation systems. In this study, we designed, simulated, and fabricated an arrayed waveguide grating (AWG) based on a silicon on insulator (SOI) substrate. Test results indicate that this AWG has an on-chip insertion loss of 3 dB, crosstalk of less than －20 dB, and a 3 dB bandwidth of 2.3 nm. We constructed a demodulation system based on this AWG, and experimental results show that the system achieves a demodulation accuracy of 34.2 pm within a 0.8 nm range, with a wavelength resolution of 6 pm.

Key words: arrayed waveguide grating; silicon on insulator; fiber optic sensing; fiber optic grating demodulation system; photonic integration

0　引言

光纤布拉格光栅（FBG）传感器是一种光纤传感元件，可以灵活地附着在被测对象的表面或内部。因此，在航空航天、深海探测、结构健康监测等领域越来越受欢迎。当外界物理量发生变化时，FBG 反射光的中心波长会发生偏移。因此，在 FBG 传感解调领域，如何准确识别 FBG 反射光的波长变化至关

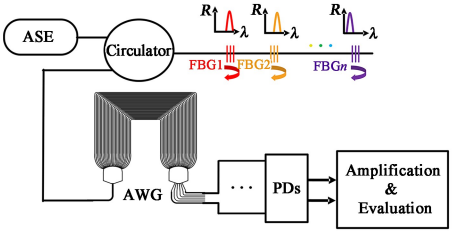
收稿日期：2023－09－12.

基金项目：国家自然科学基金项目（62205030）；北京市教育委员会科学研究计划项目（KM202211232019）.

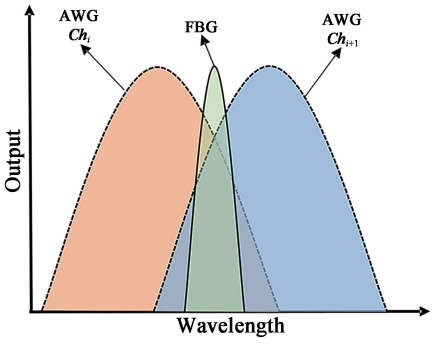
* **通信作者：**袁　配

重要。目前有许多基于分立光学和光电元件的FBG解调仪被广泛使用，如可调法布里-珀罗滤波器、可调激光器、电荷耦合器件和FBG滤波器等等。然而上述解调仪均难以满足小型化、轻量化和低功耗的要求[1-7]。利用光子集成回路(Photonic Integrated Circuits，PIC)可以将光波导、分束器、耦合器等器件集成到单个芯片上，降低光学系统的复杂性，显著减小FBG解调系统的体积[8-11]。

阵列波导光栅(AWG)在基于PIC的传感解调领域已经得到了广泛研究[12-13]。基于AWG的FBG解调系统示意图及波长解调原理图如图1所示。来自宽谱光源的光信号通过环行器到达FBG。FBG反射符合布拉格条件的窄带光，再通过环行器进入AWG。AWG的输出端连接到光电探测器(PD)阵列和数据处理电路。当FBG反射光通过AWG的相邻两通道时，FBG反射光谱与AWG两个相邻通道的透射光谱重叠。通过监测AWG相邻通道的光功率变化，就可以成功解调出FBG中心波长的变化。



(a) 基于AWG的FBG解调系统示意图



(b) 波长解调原理图

图1 基于AWG的FBG解调系统及波长解调原理图

公式(1)为FBG解调公式，其中 P_i 和 P_{i+1} 为AWG的两个最大响应通道 i 和 $i+1$ 的传输光谱与FBG反射谱之间的积分，λ_{FBG} 为FBG反射光的中心波长，λ_i 和 λ_{i+1} 为AWG相邻通道的中心波长，$\Delta\lambda_{FBG}$ 和 $\Delta\lambda_i$ 为AWG和FBG光谱的3 dB带宽。当外部温度或应变等物理因素发生变化时，FBG反射光的中心波长会产生 $\Delta\lambda$ 的漂移量，此时通过测量 P_i 和 P_{i+1} 的值，代入公式(1)就可以得到 λ_{FBG} 的值[14-16]。

$$\ln\left(\frac{P_{i+1}}{P_i}\right)=\frac{8(\ln 2)\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{FBG}^2+\Delta\lambda_i^2}\lambda_{FBG}-\frac{4(\ln 2)(\lambda_{i+1}^2+\lambda_i^2)}{\Delta\lambda_{FBG}^2+\Delta\lambda_i^2} \tag{1}$$

通过公式(1)可以看出，基于AWG的光子集成解调法仅受到AWG输出光功率比的影响。因此，实现大范围、高精度、高分辨率解调系统的关键在于高性能AWG器件的设计。本文设计、模拟和制备了一种信道间隔为400 GHz的6通道AWG，并利用该AWG来实现FBG的解调测试。

1 AWG的设计与仿真

AWG是一种光学分光器件，其结构如图2所示，包括输入/输出波导、阵列波导和平板波导。AWG的运行原理基于光的多径干涉效应。当光进入AWG后，由于相邻阵列波导之间存在一定的长度差，光波会发生干涉和衍射，从而形成不同波长的光信号在输出波导上的分离。

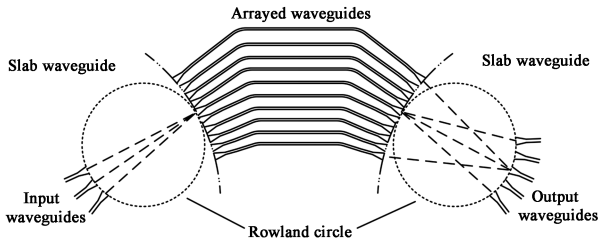


图2 AWG结构图

为了实现更紧凑的器件尺寸，选择在具有高折射率差的绝缘体硅(Silicon on Insulator，SOI)平台上设计AWG。SOI的芯层厚度为220 nm。脊型波导有着良好的工艺容差，传输损耗相对较小，因此，综合考虑材料特性和光学性能，选择脊型波导作为波导的形状。

图3仿真了脊型波导有效折射率随波导宽度的变化。当波导宽度小于500 nm时，波导中只存在TE0模。为保证单模传输将波导宽度设置为500 nm。图4给出了脊型波导的截面示意图及模场分布图。

插入损耗是影响AWG性能的关键因素。AWG的部分插入损耗源于不同波导结构之间的模式不匹配，尤其是平板波导、阵列波导以及输入/输出波导之间的转换损耗。为了减小这种转换损耗，本文采用了双蚀刻结构，以确保平板波导与阵列波

导、输入/输出波导之间的光场平滑耦合。

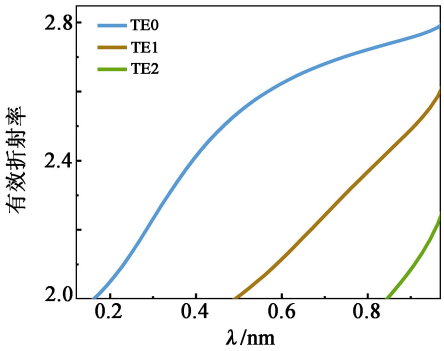
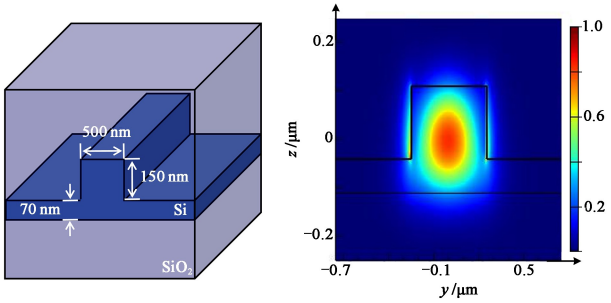


图 3　脊型波导的有效折射率随波导宽度的变化



(a) 截面示意图　　(b) 模场分布

图 4　脊型波导截面示意图和模场分布

双蚀刻结构的设计如图 5 所示，包括三个关键部分：第一段，是一个有 150 nm 的蚀刻深度的脊型波导结构；第二段，是一个双脊型结构，将第一段与第三段连接，以实现平滑的过渡；第三段，是一个具有 70 nm 刻蚀深度的脊型波导结构，连接至 220 nm 厚的平板波导区域。在双蚀刻结构的第二段和第三段，采用线性 taper 结构来实现光场的平滑过渡，taper 的开口宽度分别为 1.5 μm 和 0.8 μm。

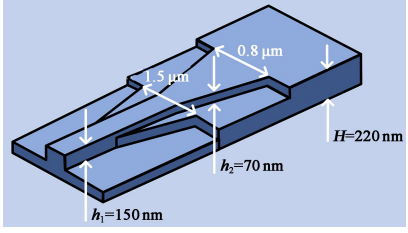


图 5　双蚀刻结构示意图

AWG 的具体设计参数，如阵列波导长度差 ΔL、信道间隔 $\Delta\lambda$、FSR、罗兰圆直径 R、衍射级数 m 和阵列波导间距 d，可根据以公式(2)求得[17-19]。

$$\begin{cases}\Delta L = m\lambda / n_c \\ FSR = \lambda_0 n_c / m n_g \geqslant N\Delta\lambda \\ n_g = n_c - \lambda \cdot (\mathrm{d}n_c/\mathrm{d}\lambda) \\ \Delta\lambda = \Delta x_o n_s d n_c / R m n_g \end{cases} \tag{2}$$

式中，n_s 和 n_c 分别是平板波导和阵列波导的有效折射率，n_g 是群折射率。表 1 给出了 AWG 的设计参数。

表 1　AWG 的设计参数

通道数	1×6
输入/输出波导间距($\Delta x_i/\Delta x_o$)/μm	1.5
阵列波导间距 d/μm	1
阵列波导数 N_a	55
信道间隔 $\Delta\lambda$/nm	3.2
衍射级数 m	12
罗兰圆直径 R/μm	74.3
阵列波导长度差 ΔL/μm	73.4

根据上述参数仿真了 AWG 输出光谱，其结果如图 6 所示。从仿真光谱中可以观察到，串扰小于 −30 dB，插入损耗为 −1.5 dB，3 dB 带宽为 1.5 nm。

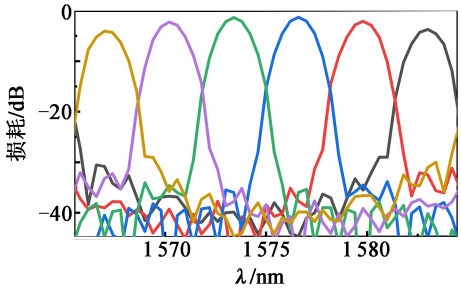


图 6　单边输入和双边输入的 AWG 的仿真光谱

2　AWG 的制备与测试

按照上述设计参数，委托中国联合微电子中心(CUMEC)有限公司制造了 AWG 芯片。制造工艺流程如图 7 示。首先，对 SOI 基片进行预处理；其次，使用匀胶机将光刻胶均匀地涂覆于基片的表面；再利用深紫外光刻(Deep Ultraviolet Lithography，DUVL)技术在基片上曝光出所需图案；然后，利用电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma，ICP)技术刻蚀硅波导；完成两次刻蚀之后，清洁光刻胶；最后，使用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)形成二氧化硅保护层。图 8 为制备的 AWG 芯片的光学显微镜图像。

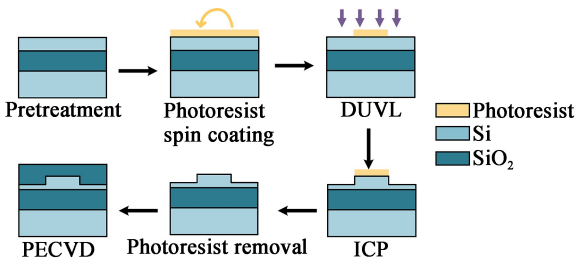


图 7　AWG 制备工艺流程图

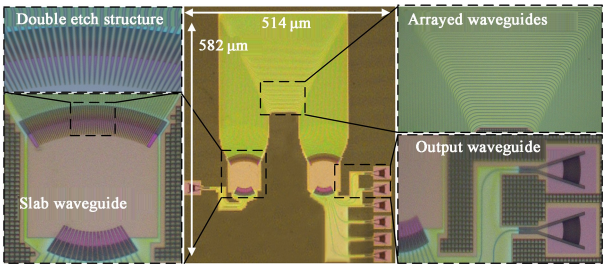


图 8 AWG 的光学显微镜图像

为测试 AWG 芯片的光谱，在恒温的超洁净室内搭建了如图 9 所示的光谱测试系统。光源发射的光通过单模光纤垂直耦合到 AWG 的输入光栅耦合器。AWG 输出的光信号再经过分路器分别连接到光谱仪和光功率计。图 10 为 AWG 的测试光谱，可以看出，AWG 的插入损耗为 3 dB，串扰小于－20 dB，3 dB 带宽为 2.3 nm。

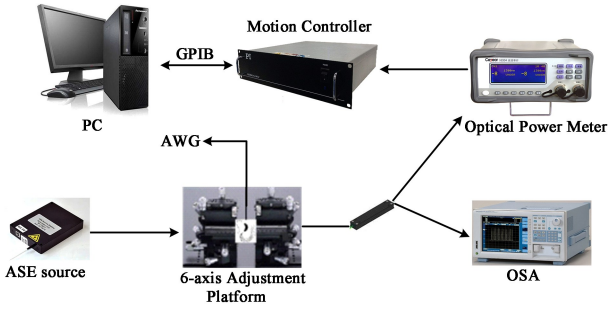


图 9 光谱测试系统

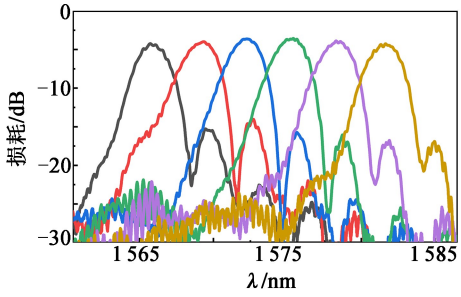


图 10 AWG 光谱图

为了测试该芯片的解调性能，搭建了如图 11 所示的解调测试系统。利用可调谐激光器输出的窄带高斯光来代替 FBG 的反射光。光功率计和主机用于收集和处理经 AWG 解调后的信号。

图 12 展示了 AWG 芯片的解调精度与分辨率的测试结果。解调精度是指解调系统在解析和测量光信号时的准确程度，它用于衡量解调系统是否能够准确地检测到 FBG 反射波中心波长的微小变化。解调精度使用均方根误差（Root Mean Squared Error，RMSE）表示。图 12(a)通过对实验数据进行线性拟合得到实验数据与拟合线之间的 RMSE 为 0.01126。因此，得到该解调系统在 0.8 nm 的解调范围内解调精度为 11.26 pm。

波长分辨率是指解调系统可以分辨的最小波长变化。它用于衡量解调系统在光谱解调过程中能否精确地分辨不同波长光信号之间的微小差异。图 12(b)为波长分辨率的测试结果，当可调谐激光器输出波长变化 6 pm 时，测得的光功率比的对数会出现明显的变化，因此得到该解调系统的波长分辨率为 6 pm。

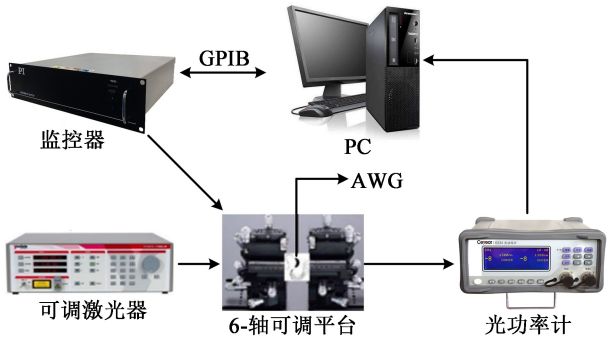


图 11 解调测试系统示意图

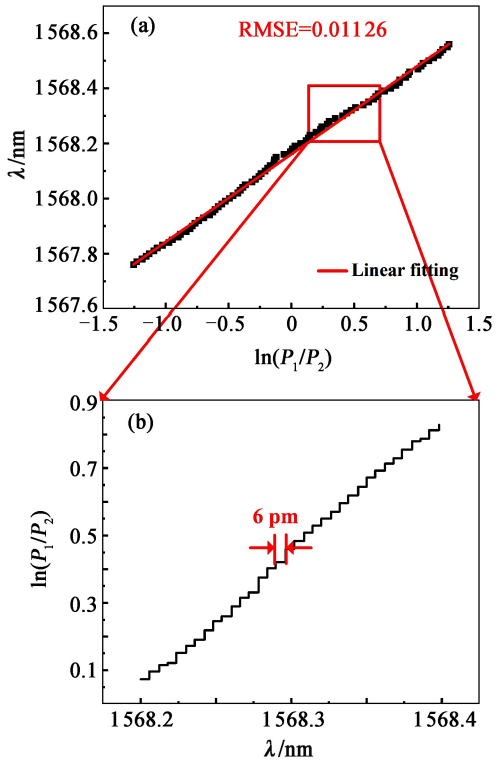


图 12 解调测试结果。(a) 解调精度；(b) 解调分辨率

3 结论

本文设计、模拟并制造了一种应用于 FBG 波长解调的 AWG 芯片。经测试，该 AWG 芯片的片上插入损耗为 3 dB，串扰优于－20 dB，3 dB 带宽为 2.3 nm。搭

建了基于该AWG的解调系统，解调实验结果表明，该系统在0.8 nm范围内的解调精度可达11.26 pm，波长分辨率为6 pm。解调测试的结果证实，本文提出的AWG具有出色的解调性能，在FBG解调领域具有很大的应用潜力。

参考文献：

[1] Gassino R, Perrone G, Vallan A. Temperature monitoring with fiber Bragg grating sensors in nonuniform conditions[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1336-1343.

[2] Hsu C-Y, Chiang C-C, Hsieh T-S, et al. A study of strain measurement in cylindrical shells subjected to underwater shock loading using FBG sensors[J]. Optik, 2020, 217(9): 164701.

[3] Liang Q, Zou K, Long J, et al. Multi-component FBG-based force sensing systems by comparison with other sensing technologies: A review[J]. IEEE Sensors J., 2018, 18(18): 7345-7357.

[4] Karatas C, Degerliyurt B, Yaman Y, et al. Fibre Bragg grating sensor applications for structural health monitoring [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technol., 2018, 92(3): 355-367.

[5] Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing [J]. Opt. Lett., 2010, 35: 1007-1009.

[6] Xu G, He B, Li H, et al. FBG pressure sensor in pressure distribution monitoring of ship[J]. Opt. Express, 2022, 30(12): 21396-21409.

[7] Kuhn G G, Sousa K M, Martelli C, et al. Embedded FBG sensors in carbon fiber for vibration and temperature measurement in power transformer iron core [J]. IEEE Sensors J., 2020, 20(22): 13403-13410.

[8] Mukherjee A K, Xiang M, Preu S. Broadband terahertz photonic integrated circuit with integrated active photonic devices[J]. Photonics, 2021, 8(11): 492.

[9] Theurer M, Moehrle M, Sigmund A, et al. Flip-chip integration of InP to SiN photonic integrated circuits[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(9): 2630-2636.

[10] Wang L P, Ren C, Cao D Z, et al. Dynamic modulation in graphene-integrated silicon photonic crystal nanocavity[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(6): 334-340.

[11] Zhang W, Yao J. Photonic integrated field-programmable disk array signal processor[J]. Nat. Commun., 2020, 11(1): 406.

[12] Li K, Dong M-L, Yuan P, et al. Review of fiber Bragg grating interrogation techniques based on array waveguide gratings[J]. Acta Phys. Sin., 2022, 71(9): 094207.

[13] Marin Y E, Nannipieri T, Oton C J, et al. Current status and future trends of photonic-integrated FBG interrogators [J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(4): 946-953.

[14] Sano Y, Yoshino T. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber bragg grating sensors[J]. J. of Lightwave Technol., 2003, 21(1): 132-139.

[15] Weng S, Yuan P, Zhuang W, et al. SOI-based multi-channel AWG with fiber Bragg grating sensing interrogation system [J]. Photonics, 2021, 8(6): 214.

[16] Yuan P, Weng S, Ji S, et al. Performance analysis of fiber Bragg grating sensor interrogators based on arrayed waveguide gratings[J]. Optical Engineering, 2021, 60(6): 066101-1-9.

[17] Ji S, Li K, Yuan P, et al. Design and fabrication of AWG with large bandwidth applied in FBG interrogation system [J]. Optics & Laser Technol., 2022, 149:107372-1-52.

[18] Li K, Yuan P, Lu L, et al. PLC-based arrayed waveguide grating design for fiber Bragg grating interrogation system [J]. Nanomaterials (Basel), 2022, 12(17): 2938-1-12.

[19] Li S, Yuan P, Li T, et al. SOI-based 15-channel arrayed waveguide grating design for fiber Bragg grating interrogator [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2023, 53: 101113-1-8.

作者简介：

李姝锋(1999—)，女，硕士，主要研究方向为半导体光子集成技术、光纤传感与解调技术；

袁　配(1989—)，女，博士，副教授，主要研究方向为半导体光子集成技术、光纤传感与解调技术，以及微纳光子器件及芯片。