

基于掺杂氧化硅波导的受激布里渊散射瞬时频率测量

李淑静, 李 杏, 陈建平, 邹卫文 *

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对布里渊模拟信号处理系统小型化的需求, 提出一种基于掺杂氧化硅波导的受激布里渊散射瞬时频率测量 (SBS-IFM) 方案。这种方案在链路中添加锁相放大器与滤波器, 有效滤除了反射光, 放大并观测到了掺杂氧化硅波导中的布里渊增益信号。通过相对移动泵浦光和探测光的调制频率, 实现了基于掺杂氧化硅波导的 SBS-IFM, 其 IFM 范围约 15 GHz, 精度达 60 MHz。

关键词: 微波光子; 瞬时频率测量; 布里渊增益; 氧化硅波导; 模拟信号处理

中图分类号: TM935.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)08-0027-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Instantaneous frequency measurement of stimulated Brillouin scattering based on doped silica waveguides

LI Shujing, LI Xing, CHEN Jianping, ZOU Weiwen*

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the requirement of miniaturization of Brillouin analog signal processing system, this paper presents a stimulated Brillouin scattering instantaneous frequency measurement (SBS-IFM) scheme based on the doped silica waveguide. In this scheme, the reflected light is effectively filtered out, and the Brillouin gain signal in the doped silica waveguide is amplified and observed by adding a lock-in amplifier and a filter. SBS-IFM based on the doped silica waveguide is realized by relatively moving the modulation frequency of pump light and the probe light, the IFM range of this scheme is about 15 GHz and the accuracy can reach 60 MHz.

Key words: microwave photons; instantaneous frequency measurement; Brillouin gain; silica waveguide; analog signal processing

0 引言

瞬时频率测量(IFM)是一种快速获取未知微波信号时变频谱信息的信号处理技术。基于微波光子技术的 IFM 具有宽带宽、低损耗、大可调性和抗电磁干扰的优势,有望成为取代电子微波频率测量的一种更优选择^[1]。根据待测微波频率所携带的信息,基于微波光子技术的 IFM 可分为单一微波频率的测量技术和多个微波频率的测量技术。这些技术主要通过色散、微波光子滤波^[2]等光学原理,将待测信号的频率信息映

射为功率信息^[3]、空间信息或时间信息^[4]来实现。

受激布里渊散射(SBS)的窄带宽的频率选择特性使其能够应用于高质量的微波光子滤波技术和微波频谱分析等领域^[5-7],基于 SBS 的频率检测技术^[8-9]可实现高达 50 GHz 的带宽和 20 MHz 的分辨率。随着制造工艺和材料技术的进步,人们开始研究芯片、波导等小型传输介质的 SBS 特性,并将其应用于片上微波光子模拟信号处理系统。基于 SBS 的模拟信号处理系统在小型化的过程中首要面临的是介质小型化的问题。传统的石英光纤几百到几千米的长度无法满足集成化的要求,为了实现 SBS 模拟信号处理系统的小型化,需要用光波导来替代传统的石英光纤。目前,研究者已在多种材料制成的波导和芯片中观测到 SBS 现象,并实现了基于片上 SBS 的延时、滤波等技术^[10-13]。

作为重要的光子材料,掺杂二氧化硅具有独特的优势。高折射率掺杂二氧化硅具有和互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容的特性以及高非线性性和低损耗的

收稿日期:2020-01-29。

基金项目:国家自然科学基金(61822508、61571292、61535006)资助。

作者简介:李淑静(1995—),女,硕士生,主要研究方向为掺杂氧化硅波导中的受激布里渊散射现象及其在模拟信号处理领域中应用,包括掺杂氧化硅波导中的布里渊特性分析、基于掺杂氧化硅波导的瞬时频率测量应用等。在校期间曾获得国家二等奖学金、国家重点实验室突出贡献奖等。

* 通信作者:邹卫文(E-mail: wzou@sjtu.edu.cn)。



性能,这是非线性光学系统中很有优势的材料。与有机聚合物材料相比,掺杂二氧化硅波导具有器件尺寸小和集成度高的优势;与绝缘体上硅(SOI)相比,它还具有制备简单、与光纤的耦合度高和工艺成本低等优点。因此,它是片上SBS应用的绝佳选择之一。

由于二氧化硅介质的布里渊增益系数较小,中等功率水平下在具有单通道几何结构的芯片级平台上激发和观测到二氧化硅中的SBS现象极具挑战性^[14]。本课题组前期通过改进传统的布里渊增益谱测量方案,成功观测到了掺杂二氧化硅波导中的SBS现象^[8]。但是,想要将其应用到IFM系统中,还要面临以下问题:①波导两端通过与单模光纤(SMF)耦合连接到系统中,由于波导和SMF的模式失配,在耦合端面存在严重的损耗和泵浦反射;②波导的光程只有米量级,和传统的石英光纤相比,信号在介质中的反应时间非常短,待测信号可获得的布里渊增益受到严重限制。为了解决这些问题,本文基于泵浦和探测信号的逻辑关系,改进课题组早期提出的SBS-IFM方案,实现基于掺杂氧化硅波导的SBS-IFM。

1 基于掺杂氧化硅波导的SBS-IFM实验原理

本文采用低损耗的掺杂二氧化硅作为波导芯层,尺寸为 $2 \times 4 \mu\text{m}^2$,折射率 n_{core} 为1.54;周围是二氧化硅包层,上、下包层折射率(n_{cladding} 、 n_{sub})分别为1.46和1.446;波导两端分别耦合有1 m长的SMF。掺杂二氧化硅波导通过CMOS兼容工艺制造,使用化学气相沉积方法来沉积芯膜,并将器件图案印刷在光刻胶中,然后通过离子反应进行刻蚀^[15]。波导的长度为1 m,其内部结构如图1所示。实验过程中,输入到波导中的泵浦光功率为20 dBm,波长为1550 nm,测得波导的主峰布里渊频移(BFS)为15.24 GHz,主峰线宽为60 MHz。

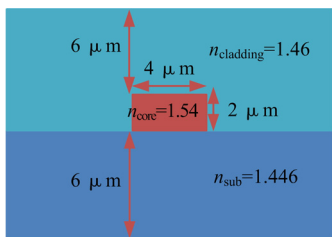


图1 掺杂氧化硅波导的内部结构图

本课题组早期提出的SBS-IFM实验框图如图2所示。分布反馈激光器(DFB-LD)输出波长为1552 nm的信号被50:50光纤耦合器分成2路:一路作为泵浦光,由具有20 GHz带宽的电光调制器(EOM)调制;一路作为探测光,通过带宽为20 GHz的单边带调制器(SSBM)进行单边带调制。选择探测光的下边带,使得探测光和泵浦光的拍频达到可以发生SBS反应的条件。偏振控制器PC1和PC2使光信号在进入调制器之

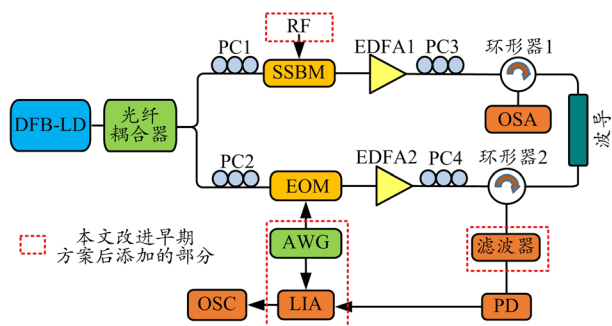


图2 课题组早期提出的SBS-IFM实验框图及本文改进后的实验框图前达到最佳偏振状态。利用掺铒光纤放大器(EDFA)对泵浦光和探测光的光功率进行放大和控制。PC3和PC4的作用是优化光信号进入介质之前的光偏振状态,确保介质中最大的SBS相互作用。利用带宽为20 GHz的光电探测器(PD)检测被放大后的探测光信号,将其转换为电信号,并以电压的形式输出到示波器(OSC)中。为了保证不损坏器件,输入到PD的光功率应小于-5 dBm。

实验中用到的波导在1550 nm波长下的传输损耗为1.8 dB,但是由于波导两端和SMF的耦合损耗较大,导致波导最终的插入损耗为9.3 dB,使得探测光在被放大的过程中遭受到严重衰减。而且,由于波导和SMF的耦合端面存在严重的反射现象,入射的泵浦光经过端面的反射后会有不可忽略的一部分和被放大的探测光一同输出到PD中,这严重影响了探测光的观测。同时,由于波导的长度仅有1 m,可容信号发生SBS反应的时间非常短,严重限制了探测光能够获得的布里渊增益。

因此,本文针对掺杂氧化硅波导损耗高、光程短和反射严重的特点,对课题组早期提出的SBS-IFM方案进行了以下调整(详见图2中红色虚线框内的部分):改用微波源产生的时间长度为2 ms的射频(RF)信号对探测光进行调制,每个频率点的时间长度为2 ms;在探测光进入PD前,要经过一个可调光滤波器滤除反射的泵浦信号,滤波器的中心波长被设置为探测光的波长,带宽被设置为0.2 nm;在链路中添加了锁相放大器(LIA),使探测光获得的布里渊增益能够被检测到;由于LIA可识别的信号频率上限为2 MHz,因此用来调制泵浦光的方波信号频率受限,不能采取原方案中调谐泵浦光频率、放大对应频率并依次检测探测光的方法,而是改用任意波形发生器(AWG)产生低频方波信号,并使用EOM将方波信号调制到泵浦光上,该方波信号同时被用作LIA的外部参考信号。

实验过程中, 探测光调制信号频率初始值为 0.2~16.2 GHz。假设载波频率为 f_0 GHz, 探测光通过 SSBM 被调制到了下边带, 那么调制后探测光的频率为 $(f_0-16.2) \sim (f_0-0.2)$ GHz。由于波导在 1550 nm 时的 BFS 为 15.24 GHz, 而泵浦光的调制信号频率很低, 所以可以认为泵浦光频率一直保持在 f_0 不变, 则泵浦光会放大频率为 $(f_0-15.24)$ GHz 处的信号, 该信号恰好在探测光频率范围内, 与探测光起始频率 (即 $(f_0-16.2)$ GHz) 的相对位置为 0.96 GHz。之后, 探测光的调制信号频率开始逐步提高, 调制后的探测光与 f_0 距离越来越远, 最终当探测光的调制信号频率增长到 15.2~31.2 GHz 时, 调制后的探测光频率为 $(f_0-31.2) \sim (f_0-15.2)$ GHz, 泵浦光依然放大频率为 $(f_0-15.24)$ GHz 处的信号。该信号仍旧在探测光频率范围内, 与探测光起始频率 (即 $(f_0-31.2)$ GHz) 的相对位置为 15.96 GHz。

假设放大前的探测光为 $G(w)$, 放大后的探测光为 $G(w)'$, 二者比值应遵循以下关系:

$$G(w)' / G(w) \propto P_{\text{pump}} \times g_0 / \{1 / (2\tau_p) + i[w - (w_p - w_B)]^2\} \quad (1)$$

其中, P_{pump} 为泵浦光功率, g_0 为介质的布里渊增益, τ_p 为声子寿命, w_p 为探测光中任一被放大位置的频率, w_B 为介质的 BFS。由式(1)可知, 探测光增益是一条洛伦兹曲线, 曲线最高处对应的频率值为 BFS, 即本文的检测信号。

实验中每改变一次探测光调制信号的频率, 便从示波器上保存一组实验数据, 该数据包含每个频率采样点的频率 x 和幅度 y 这 2 个信息。探测光的调制信号频率记为 $f_1 \sim f_2$, 随着 f_1 和 f_2 的增加, 示波器上探测光增益出现的位置与探测光起始频率之间的距离越来越远。探测光上布里渊增益峰出现的相对位置通过 Matlab 拟合后就是本实验的检测量 f' , 而本实验应测的频率值 f 表示为:

$$f = (f_0 - \text{BFS}) - (f_0 - f_2) = f_2 - \text{BFS} \quad (2)$$

通过拟合公式将所测得的布里渊增益峰拟合成洛伦兹曲线:

$$y = a / [1 + b \times (x - c)^2] + d \quad (3)$$

其中, x 和 y 分别是探测光中布里渊增益谱的横、纵坐标值; a 代表洛伦兹曲线的最高点与最低点之差, 与布里渊增益峰值有关; c 代表洛伦兹曲线峰值对应的 x 值, 即对应 BFS; b 与洛伦兹曲线的线宽有关; d 是拟合得到的洛伦兹曲线峰值与 y 之差。

每一组数据中探测光的调制频率都不相同。实验过程中, 泵浦光的位置始终都未发生改变, 且泵浦光只会放大频率比它低 15.24 GHz 的信号。虽然泵浦光

所放大信号的频率不变, 但是被放大信号在宽带探测光中的相对位置却发生了变化。而在数据拟合过程中, 横坐标范围是 0~15 GHz。因此, 每次拟合得到的频移 c 都是被放大的信号分量在探测光中的相对位置 (即 f')。基于此, 本文在改变探测光在频率轴上位置的过程中, 通过探测光与泵浦光的相对运动, 扫描并测量了它的每一个频率分量。

由于偏振等因素对 SBS 反应效果的影响, 导致所测数据功率较低, 与之相对的噪声较高时, 数据拟合出现困难, 无法判定增益峰值出现的准确位置。因此, 通过拟合得到的频移信息会存在误差 ($f_2 - \text{BFS} - f'$)。

2 基于掺杂氧化硅波导的 SBS-IFM 实验结果分析

实验得到的不同探测光调制信号频率下探测光增益出现的位置变化如图 3 所示, 探测光调制信号频率从 0.2~16.2 GHz 到 15.2~31.2 GHz 以 50 MHz 的步长改变, 泵浦光的调制信号频率为 60 kHz。无论探测光的调制频率如何变化, 在探测光中总有一个频率分量能够满足与泵浦光发生 SBS 的条件。

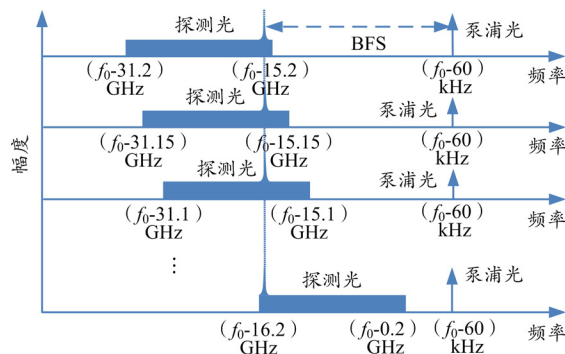


图 3 不同探测光调制信号频率下探测光增益出现的位置变化情况

不同探测光调制信号起始频率下探测光增益出现的位置如图 4 所示。当探测光的调制信号频率为 0.2~16.2 GHz (对应起始频率为 0.2 GHz) 时, 探测光上增益出现的位置为对应为调制信号起始频率 15.04 GHz 处; 当探测光的调制频率变成 15.2~31.2 GHz (对应起始频率为 15.2 GHz) 时, 探测光上增益出现的位置为相对于调制信号的起始频率 0.04 GHz 处。这表明随着探测光调制信号频率的提高, 被放大的频率点离调制信号的起始频率点越来越近。

本文对每次改变探测光调制频率所测得的数据进行处理分析, 待测频率与测得频率之间的误差如图 5 所示。其中, 最大误差约为 0.027 GHz。造成测量结果误差的原因可能有以下 3 个方面:

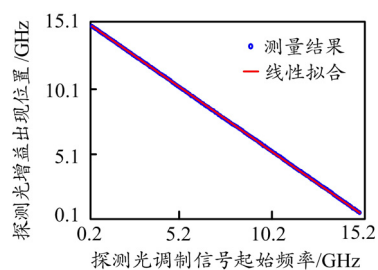


图4 不同探测光调制信号起始频率下探测光增益出现的位置

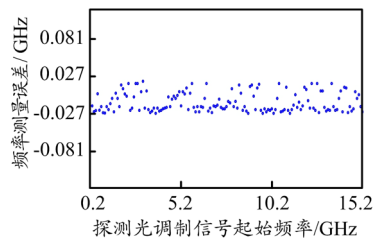


图5 基于掺杂氧化硅波导的SBS-IFM实验误差分析

①光信号的偏振状态。偏振状态控制好的情况下,示波器上显示的洛伦兹曲线清晰平滑且峰值较高;偏振状态控制差的情况下,示波器上显示的洛伦兹曲线模糊且有诸多毛刺,另外,峰值与前者相差较大的极端情况下,测得的洛伦兹曲线已无法准确计算出峰值对应的频率信息。由于偏振状态会直接影响布里渊增益峰值的大小和信号质量,信号质量越好,信噪比越高,则拟合结果越准确;信号质量越差,拟合过程中对频移 c 的定位偏差越大。因此,在本文中,偏振变化通过影响信号的布里渊增益强弱,从而影响了后期数据处理过程中对布里渊增益峰的定位,给数据处理结果带来误差。根据数据处理结果,该误差范围在40 MHz以内。

②由于探测光和泵浦光的调制微波信号分别由AWG和微波源生成,这2路信号的时钟和相位都不同步,而本文所用的LIA是以泵浦光的调制信号为外部参考信号来识别被泵浦放大的探测信号,两者之间的不同步也会导致检测到的布里渊增益时高时低,从而影响数据处理结果。

③本文采用的频率映射方法测量精度受到的最大限制不是偏振变化,而是介质的布里渊增益谱线宽。由于所用的掺杂氧化硅波导在泵浦光功率为20 dBm的条件下线宽约60 MHz,无法区分出频率差小于其线宽的信号,因此本方案的测量精度为60 MHz。

3 结束语

本文提出了一种基于掺杂氧化硅波导的SBS-IFM方案。通过对LIA和可调光滤波器的使用,激发并观测到掺杂氧化硅波导中的SBS现象。针对掺杂氧化硅波导损耗高、光程短和端面反射严重的特点,改进了课题组前期的SBS-IFM方案,提出一种泵浦-探测相对移动的逻辑关系,并在实验中观测到探测光上不同频率分量被泵浦光放大获得的布里渊增益,验证了

在掺杂氧化硅波导上进行SBS-IFM的可行性,可在约15 GHz的带宽范围内达到60 MHz的测量精度。本研究为SBS模拟信号处理系统的小型化提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] KARIMI A, AGHAKHANI K, MANAVI S E, et al. Introduction and Analysis of Optimal Routing Algorithm in Benes Networks [J]. Procedia Computer Science, 2014, 42(6): 313-319.
- [2] NGUYEN L V T, HUNTER D B. A photonic technique for microwave frequency measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(10): 1188-1190.
- [3] PAN S L, YAO J P. Instantaneous microwave frequency measurement using a photonic microwave filter pair [J]. IEEE photonics technology letters, 2010, 22(19): 1437-1439.
- [4] FU S N, TANG M, SHUM P. Instantaneous microwave frequency measurement using optical carrier suppression-based DC power monitoring [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24712-24717.
- [5] NGUYEN T A, CHAN E H W, MINASIAN R A. Instantaneous high-resolution multiple-frequency measurement system based on frequency to time mapping technique [J]. Optics letters, 2014, 39(8): 2419-2422.
- [6] TANEMURA T, TAKUSHIMA Y, KIKUCHI K. Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. Optics letters, 2002, 27(17): 1552-1554.
- [7] OKAWACHI Y, BIGELOW M S, SHARPING J E, et al. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 153902-1-153902-4.
- [8] LONG Xin, ZOU Weiwen, CHEN Jianping. Broadband instantaneous frequency measurement based on stimulated Brillouin scattering [J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2206-2214.
- [9] ZOU W W, LONG X, XIN G Y, et al. Brillouin instantaneous frequency measurement with an arbitrary response for potential real-time implementation[J]. Optics Letters, 2019, 44(8): 2045-2048.
- [10] BYRNES A, PANT R, LI E, et al. Photonic chip based tunable and reconfigurable narrowband microwave photonic filter using stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Express, 2012, 20(17): 18836-18845.
- [11] LAER R V, BAZEN A, KUYKEN B, et al. Net on-chip Brillouin gain based on suspended silicon nanowires[J]. New Journal of Physics, 2015, 17: 115005-1-115005-10.
- [12] BELT M, HUFFMAN T, DAVENPORT M L, et al. Arrayed narrow linewidth erbium-doped waveguide-distributed feedback lasers on an ultra-low-loss silicon-nitride platform [J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4825-4828.
- [13] JIANG H, MARPAUNG D, PAGANI M, et al. High-precision multiple microwave frequency measurement using a chip-based photonic Brillouin filter[J]. Optica, 2016, 3(1): 30-34.
- [14] CHOUDHARY A, MORRISON B, ARYANFAR I, et al. Advanced integrated microwave signal processing with giant on-chip Brillouin gain [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 35(4): 846-854.
- [15] WANG W Q, ZHANG W F, CHU S T, et al. Repetition Rate Multiplication Pulsed Laser Source Based on a Micro-ring Resonator[J]. ACS Photonics, 2017, 4(7): 1677-1683.