

基于迈克耳孙干涉仪的微机械光纤信号调制器

丁芳媛 贾 峰 张天浩

(南开大学物理科学学院光子学中心弱光非线性光子学教育部重点实验室,
天津市信息光子材料与技术重点实验室, 天津 300071)

摘要 基于迈克耳孙干涉仪原理,设计了利用双光束干涉效应的微机械光纤信号调制器。实验中从输入端输入的光纤信号,经分光板后分为光强相等的透射光束与反射光束;调制信号以电压形式加载于压电陶瓷,使其伸缩振荡,以调制透射光束与反射光束之间的光程差;透射光束与反射光束经透镜聚焦后在输出端面发生双光束干涉,在输出端输出被调制的光信号,再耦合进光纤。这种光纤信号调制器属于振幅调制类型,实验中光纤信号调制器调制度优于 90%,信噪比约为 18 dB,带宽约为 200 kHz。此调制器件具有结构简洁、调制度高、稳定性好和价格低廉,适用于全光纤光路的特点,可应用于低频光纤传输信号的调制及信号斩波等。

关键词 光学器件;光调制器;迈克耳孙干涉;光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0323001

Michelson Interferometer Based Micro-Mechanical Modulator Working on Fiber Signal

Ding Fangyuan Jia Feng Zhang Tianhao

(Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, Tianjin Key Laboratory of Photonics Materials and Technology for Information Science, Photonics Research Center, School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract A micro-mechanical modulator is designed based on the Michelson interferometer. In the experiment, the fiber signal is input from the input-port and divided into two equal parts; the transmitted beam and the reflected beam, by beam-splitter. The modulating voltage signal is amplified and drives the piezoelectric ceramic pipe to do stretch oscillation in order to modulate the optical-path difference between the transmitted beam and the reflected beam. The transmitted beam and the reflected beam are interfered at the output-port and focused into fiber again. Then a modulated fiber signal is obtained. The modulator is operated for amplitude modulation. In the experiment, the modulation ratio is prior to 90%, signal-to-noise ratio is about 18 dB, and the bandwidth is also about 200 kHz. This device has the merit of high modulation ratio and low price, and can be applied as a modulator or chopper in optical signal transmission system.

Key words optical devices; optical modulator; Michelson interferometer; fiber

OCIS codes 230.0230; 230.4110; 060.2310

1 引 言

在光通信系统中,光学信号调制是光电系统中

的一个重要环节,是指改变光波的振幅、强度、相位或频率、偏振等参数使之携带信息的过程^[1]。调制

收稿日期: 2010-06-01 **收到修改稿日期**: 2010-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(10874094, 61078014)、长江学者和创新团队发展计划和高等学校学科创新引智计划[B07013, CNKBRF(2011CB923003)]

作者简介: 丁芳媛(1987—),女,硕士研究生,主要从事生物医学光学方面的研究。

E-mail: dingfy2009@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 张天浩(1971—),男,博士,教授,主要从事非线性光学及生物医学光学等方面的研究。

E-mail: zhangth@nankai.edu.cn

的目的是对所需要处理的信号或被传输的信息做某种形式的变换,使之便于处理、传输和检测^[2]。光调制可分为内调制和外调制两类,所谓内调制是指将欲传输的信号直接加载于光源,以改变光源的输出特性来实现调制。其中最简单的是对半导体激光器的驱动电源用调制信号直接控制,从而实现对所发射激光的强度进行调制的目的。外调制是在光源外的光路上放置调制器,将欲传输的信号加载于调制器上^[3,4]。当光通过调制器时,透过光的物理性质(强度、相位、频率和偏振等)将发生变化,从而实现信号的调制^[5]。

微光机电系统可分为两类:机电一体化技术和微机械技术。前者是指提高光学器件和装置的精度,利用精密的驱动控制技术实现光学目的的器件和装置^[6]。后者是指将制作半导体器件的光刻工艺用于制作微机械,利用微细加工技术一次性制作很多微小器件。这两种技术均是利用结构控制技术来实现光学器件和装置的功能。例如在光纤自动连接转换装置中的机械手的柔性机械;光开关中的光纤和反射镜的驱动;光波控制组件中的微制动器和精密机械控制均已成为关键性技术^[7]。在微光机电系统广泛应用的今天,微光机电系统与全光通信器件研究的交集成为今后研究的重要方向^[8]。

本文基于迈克耳孙干涉仪的原理,利用压电陶瓷作为微机械控制部件^[9],设计了结构简洁、性能优良并且价格低廉的微机械光调制器。这种光纤信号调制器主要针对信号振幅调制,可应用于光纤传输信号的调幅及斩波等。

2 设计原理

迈克耳孙干涉仪是一种分振幅的干涉装置,其特点是光源、两个反射面和接收器四者在空间完全分开,易于扩展与改进^[10]。迈克耳孙干涉仪光路如图1所示, M_1 和 M_2 是一对精密磨光的平面镜, G_1 和 G_2 是厚度和折射率都很均匀的一对完全相同的玻璃板。在 G_1 的背面镀有一层很薄的银膜(图1中以粗线表示镀银面),以增强 G_1 反射光的强度,使从光源射出来的光线经 G_1 后形成强度近似相等的反射光束与透射光束。经 G_1 后,反射部分光束入射到 M_1 ,经 M_1 反射后再次透过 G_1 到达出射端;透射部分光束入射到 M_2 ,经 M_2 反射后,经补偿玻璃板 G_2 ,再经 G_1 上的半镀银面反射到输出端。

在迈克耳孙干涉仪中,平面镜 M_2 通过 G_1 背面银膜所成的虚像为 M'_2 ,输出的光信号亦可等效看

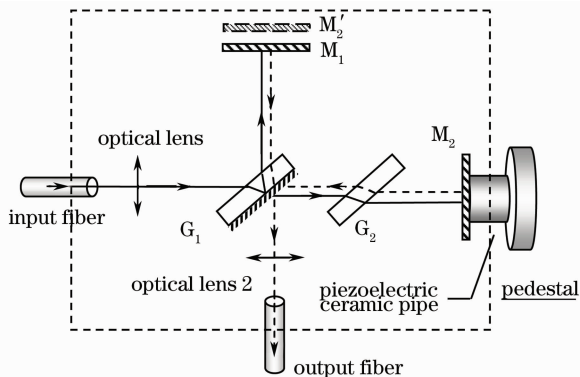


图1 迈克耳孙干涉仪原理及核心器件结构
Fig. 1 Principle of Michelson's interferometer and structure of the core device for the modulator

作入射光束在平面镜 M_1 与虚像 M'_2 之间所夹的空气层中发生薄膜干涉所产生。如果光源为扩展光源,当 M_1 和 M'_2 平行时,得到等倾圆条纹;当 M_1 和 M'_2 相交时,得到等厚条纹;若 M_1 和 M'_2 距离较大时,条纹消失。如果光源为平行光源且 M_1 和 M_2 平行时,当反射光束与入射光束光程差为半波长的偶数倍时,光信号相干加强;当反射光束与入射光束光程差为半波长奇数倍时,光信号相干相消。光纤信号调制器的设计中利用的就是平行光源的干涉效应。输入光纤发出的光为扩展光源可利用透镜1转换为平行光。

调制信号通过放大电路放大后加载在微机械控制部件压电陶瓷管上,由于逆压电效应压电陶瓷随着调制信号伸缩振荡^[11],进而带动反光镜 M_2 随着调制信号同步运动,导致两光束之间光程差随调制信号同步变化^[12]。由于干涉,输出的光强随调制信号同步明暗变化,实现振幅调制。设调制信号为 $V_s(t)$,压电陶瓷管的伸缩系数为 α ,放大器放大率为 β ,压电陶瓷管的长度变化(即光程差的一半)则为

$$\Delta l = \alpha\beta V_s(t), \quad (1)$$

光程差随着调制信号的变化而变化,输出端干涉光强可表示为

$$I_{out} = I_0 \cos \{4\pi \{ \alpha\beta [V_s(t) + V_{bias}] + d_0 \} / \lambda \}, \quad (2)$$

式中 V_{bias} 是直流偏压, d_0 是压电陶瓷管相对初始位置, λ 是激光波长。在设计中使用了直流偏置电压,可通过调节 V_{bias} 调节初始位相差,用以消除压电陶瓷管相对初始位置的影响,使初始位相差为0,获得最佳干涉效果。可通过调节放大器放大率 β 调节调制信号在一个合适的范围内,即保证压电陶瓷管的长度变化导致的位相差变化小于 π 。

玻璃板 G_2 起补偿光程作用：反射光束通过玻璃板 G_1 前后共三次，而透射光束只通过 G_1 一次。有了 G_2 ，透射光束将往返通过它两次，从而使两光束在玻璃媒质中的光程完全相等^[13]。对于白光光源补偿板是必须的，对于单色光源，补偿板不是必须的。

3 结构装置

微机械光纤调制器由核心部件和辅助部件组成。核心部件配有调制信号输入端口和光纤输入、输出连接端口，光纤通过光纤适配器从调制器的光纤输入端口接入，从光纤输出端口引出。核心部件的内部构造如图 1 所示，透镜 L_1 与光纤输入端距离为 L_1 一倍焦距，使光纤输入信号转换为平行光，确保光束在器件内平行传播；透镜 L_2 与光纤输入端距离为 L_2 一倍焦距，使干涉光能够精确耦合至输出光纤，减小损耗。分光板 G_1 与入射光束和出射光束成 45° 角，光路补偿板 G_2 与 G_1 保持平行；平面反射镜 M_1 和 M_2 与反射光束和透射光束保持垂直；使干涉光束能够严格平行。平面反射镜 M_2 与压电陶瓷管粘合固定。压电陶瓷固定在基座上。压电陶瓷管为中国科学院声学研究所生产（伸缩系数 4 nm/V ，频率范围 $0 \sim 200 \text{ kHz}$ ，压电陶瓷耐压 300 V ）。经放大器放大的调制信号加载在压电陶瓷管内、外壁。利用压电陶瓷逆压电效应，压电陶瓷管随调制信号的变化沿轴向伸缩震荡。用银胶将导线分别固定在压电陶瓷管的内壁与外壁上，导线与调制信号输入端口相连。以上核心部件的内部构件用树脂封装固化。

微机械光纤调制器辅助部件主要包括：信号发生器、放大电路和直流电源。如图 2 所示。信号发生器产生调制信号，其信号可以是脉冲、锯齿波、三角和正弦波等信号；放大电路将信号发生器产生的低压信号进行放大，用以驱动压电陶瓷管伸缩。直流电源主要为压电陶瓷管提供初始偏压，调整初始光程差归零，以获得最佳的调制效果。

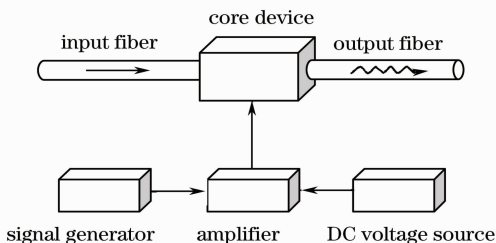


图 2 光纤信号调制器整体装置

Fig. 2 Configuration of fiber signal modulator

4 实验结果与参数分析

实验中采用工作波长为 632.8 nm 单模光纤，光纤端面由光纤切割刀精密切割，以保证光纤端面的平整，减少由于端面不平整影响光束质量。He-Ne 激光器作为光源（ 632.8 nm ），调制信号为正弦信号（ 1 V ， 50 Hz ），放大器放大率约 40。利用光电倍增管探测调制后光信号的光强。由示波器显示调制信号及调制后的光强信号，如图 3 所示。光强信号最大值 $I_{\max} = 19.1$ ，最小值 $I_{\min} = 1.2$ ，由调制度 $M = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max}$ ，得到调制度 = 93.7% 。利用锁相放大器测量调制光强信号强度 S 和噪声强度 N ，根据信噪比公式 $R_{\text{SN}} = 10 \lg(S/N)$ 得到信噪比约为 18 dB 。带宽主要受限于压电陶瓷管的工作频率，实验中使用的压电陶瓷管频率范围 $0 \sim 200 \text{ kHz}$ ，因此带宽约为 200 kHz 。如使用更高工作频率的压电陶瓷管，则带宽可进一步提高。

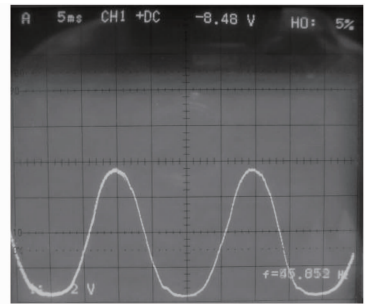


图 3 振幅调制的光强信号（50 Hz）

Fig. 3 Amplitude-modulated light-intensity signal (50 Hz)

5 结 论

这种光纤调制器的优点在于：1) 适用于全光纤光路，可与光纤直接连接，因而可对光纤传输信号以及光纤光源直接连接进行调制，并可以将调制结果直接输入到下一级光纤，使用非常方便。2) 结构简洁，性价比高，核心器件的各元件如透镜、反光镜、压电陶瓷管等容易获得，且没有特殊要求，因而整体成本较低。所需元件很少，调试中主要是准直不需要特殊工艺。在此基础上可获得优于 90% 的高调制度。3) 稳定性好，核心器件核心器件中的各个元件用树脂封装固化，留有通光孔；光纤接入和输出通过光纤适配器牢固连接，因而系统机械性能上具有很好的稳定性。如温度变化产生漂移，可调节直流偏压和放大器放大率进行校正，因而适用性强。亦可用作光纤斩波器使用，与普通机械斩波器相比振动小有更好的机械稳定性。

这种微机械光纤调制器的不足之处在于带宽较

低。因实验中所采用的核心部件——压电陶瓷管响应频率的上限仅为 200 kHz。若增大光程差变化(大于 1/2 波长,且为 1/2 波长的整数倍)时,在光程差变化的一个周期内,可以出现多个输出光强的极大值和极小值,从而使得输出光强信号的频率几倍于调制信号的频率,获得更高频率的调制以满足应用中更高带宽的需求。

综上所述,本文基于迈克耳孙干涉仪的原理,利用压电陶瓷作为微控制器件,成功研制了一种微机械光纤信号调制器。这种新型光纤信号调制器为振幅调制,具有稳定性好、结构简洁和性价比高的优点,并可与光纤直接连接,特别适用于解决全光纤光路中光的振幅调制问题,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- Xia Minmin, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. Performance comparison of 40 GHz optical millimeter wave with OFDM signal generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1586~1591
夏敏敏,董泽,曹子峥等.光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载 OFDM 毫米波信号的传输性能比较[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1586~1591
- Jiang Yuesong. *Optical Technology and Experimental* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. 196~197
江月松. *光电子技术实验*[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2000. 196~197
- Zhang Tianhao, Jia Feng, Man Jiangwei *et al.*. A new type of modulator for signal in fiber[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(5): 526~528
张天浩,贾峰,满江伟等.新型光纤信号调制器[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(5): 526~528
- Man Jiangwei, Niu Kai, Wang Shunli *et al.*. A new type of modulator for signal in fiber based on the multiple-beam interference[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(6): 669~671
满江伟,牛凯,王顺利等.基于回波干涉效应的新型光纤信号调制器[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(6): 669~671
- Shi Lingna, Pan Yingjun, Zhang Jie *et al.*. Study of display properties of lighting source based on grating light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 531~536
史玲娜,潘英俊,张洁等.基于光栅光调制器的照明光源的显示特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 531~536
- Zhang Zhihai. Study of laser projection display based on micro-opto-electro-mechanical system grating moving light modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 663~667
张智海.微光机电系统光栅平动式光调制器的激光投影研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 663~667
- Wang Yuying. Application of MME to optical communications [J]. *OME Information*, 2003, **9**: 9~14
王玉英.微机电一体化技术基础在光通信中的应用[J]. *光机电信息*, 2003, **9**: 9~14
- Shen Weidong, Zhu Yong, Huang Biqin. Analysis of the micro-opto-electromechanical system filters tunable property[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1125~1129
沈伟东,朱勇,黄弼秦.微光机电系统滤波器可调谐特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1125~1129
- Xiang Sihua, Chen Sihai, Wu Xin *et al.*. Study and test on a novel fast laser scanner based on piezo-actuators[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 408~413
向思桦,陈四海,吴鑫等.一种基于压电驱动器的新型高速激光扫描器的研制和测试[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 408~413
- Wu Bo, Chen Caihe, Ding Guilan *et al.*. Integrated optical chips in a Michelson interference acceleration seismic geophone [J]. *Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(8): 791~794
吴波,陈才和,丁桂兰等.迈克耳孙干涉型加速度地震检波器集成芯片[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(8): 791~794
- Zhang Tao, Sun Lining, Cai Hegao. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(5): 26~32
张涛,孙立宁,蔡鹤皋.压电陶瓷基本特性研究[J]. *光学精密工程*, 1998, **6**(5): 26~32
- Li Shumin, Tang Jun. Studying the characteristics of piezoelectric ceramics with Michelson interferometer[J]. *Physics Experiment*, 2008, **28**(6): 42~43
李书民,唐军.应用迈克尔孙干涉仪研究压电陶瓷的特性[J]. *物理实验*, 2008, **28**(6): 42~43
- Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1984. 309~311
赵凯华,钟锡华. *光学(上册)*[M]. 北京:北京大学出版社, 1984. 309~311