先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022072503

一种基于复合金属薄膜的EFPI型光纤声波传感器

翟　杰，鲁　平*

（华中科技大学光学与电子信息学院 光通信与光网络系，武汉 430000）

摘　要： 采用非本征法布里-珀罗干涉(EFPI)方案，设计了一种基于铬金复合金属薄膜的声波传感器，采用基于快速傅里叶变换的相位解调方法解调光纤端面和换能薄膜之间的白光干涉，提高了相位灵敏度。实验结果表明，传感器在声波频率5～1 000 Hz内，灵敏度保持在－119.98～－120.99 dB re 1 rad/μPa范围内，灵敏度变化小于1.01 dB，具有较宽的响应平坦区间；在频率150 Hz，声压0.18～5.30 Pa的范围内工作稳定，且声压和相位之间具有良好的线性关系。

关键词： 声波传感；光纤；法布里-珀罗干涉；相位解调

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0723－05

An EFPI Type Fiber Optic Acoustic Wave Sensor Based on Composite Metal Thin Film

ZHAI Jie，LU Ping

（Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430000，CHN）

Abstract： The extrinsic Fabry Perot interference scheme was used to design an acoustic wave sensor based on chromium gold composite metal thin film. At the same time，the phase demodulation method based on fast Fourier transform was used to demodulate the white light interference between the optical fiber end face and the energy conversion film，which improved the phase sensitivity. The experimental results show that the sensitivity of the sensor remains in the range of －119.98～－120.99 dB re 1 rad/μPa in the range of sound wave frequency of 5～1 000 Hz，and the sensitivity change is less than 1.01 dB，with a wide response flat range. It works stably in frequency 150 Hz and in the range of sound pressure 0.18～5.30 Pa，and there is a good linear relationship between sound pressure and phase.

Key words： acoustic sensing；optical fiber；Fabry-Perot interference；phase demodulation

0　引言

传统的电学声波传感器虽然结构机理简单并且灵敏度表现不错，但在强电磁、易燃易爆、远距离传输等环境中存在很大的应用局限。相比之下，光纤声波传感器具有体积小、重量轻、抗电磁干扰能力强、高灵敏度、高精度、易于复用、耐腐蚀、抗弯曲等优点[1-4]，已成为各国研究的热点。

目前，基于马赫-曾德尔(MZ)干涉和Michelson干涉的光纤声波传感器及其阵列是被研究最多，也最为成功的方案，但其探测精度受到相位衰落和偏振衰落的影响。Michelson干涉[5-6]和MZ干涉[7-8]传感器均是通过检测传感臂与参考臂的干涉信号相位变化来测量声信号，常通过多圈缠绕光纤来提高传感器的灵敏度，但增大传感臂长容易引入偏振衰落和温度漂移，增大低频噪声而降低稳定性，不利于测量低频声波。同时，两种干涉仪都为长臂干涉仪，尽管其在小型化的过程中取得了一定的成果，但是该结构固有的缺陷决定了基于长臂干涉仪的光纤声波传感器系统很难进行小型化设计。

对于解调算法，传统的Q点解调虽然原理简单，计算方便，但其受环境影响巨大，且因为受到解调方式的限制，动态范围小[9]。

收稿日期：2022－07－25.

基金项目：深圳市科技创新委员会项目(2021Szvup089)；湖北省自然科学基金重点项目(2021CFA033).

* **通信作者：**鲁　平　**E-mail：** pluriver@hust.edu.cn

对此，本文设计了一种基于复合金属薄膜的非本征法布里-珀罗干涉(EFPI)型光纤声波传感器，基于法布里-珀罗(FP)干涉，实现了小型化设计，并结合基于快速傅里叶变换的相位解调算法，提高了传感器的灵敏度，扩大了动态范围。

1 传感器结构和传感原理

传感器主要由光纤和声压换能薄膜组成；传感原理是声波导致换能薄膜发生振动或形变，改变了光学 FP 腔的腔长，进而调制了输出光信号，再通过对干涉光的探测解调便可表征声波的相关信息。

1.1 传感器结构

传感器根据光学 FP 腔的形成方式，可以分为两种基本类型：非本征型[10-13]和本征型[14]。

在非本征型传感器结构中，构成光学 FP 腔的两个端面分别是光纤和被固定的其他平面结构，两个端面由空气或其他任何材料隔开，以单模或多模光纤作为传输光信号的介质。非本征传感器虽然基于 FP 干涉理论，但是使用的是来自光纤外部形成的光学 FP 腔的干涉光，因此光纤只是一种将光传输到光学 FP 腔内并将产生的干涉光传输到光纤的介质。由于干涉光信号的相位值可以直接受到外部反射面的振动或形变的影响，因此这种外腔结构具有感应压力和微压的特点。

在本征型传感器结构中，光学 FP 腔位于光纤内，结构更加紧凑。在这种结构中，构成光学 FP 腔的两个端面是光纤中的两个反射组件，腔体材料通常是二氧化硅。

一般来说，非本征型传感器制造更加容易，而本征型传感器的制造则需要高成本的设备，例如飞秒激光加工或刻蚀技术[14-15]。

本文所设计的传感器结构如图 1 所示。传感器主要由两个部分构成：第一部分是声压换能薄膜，本文采用的薄膜是铬金复合金属薄膜；第二部分是单模光纤。

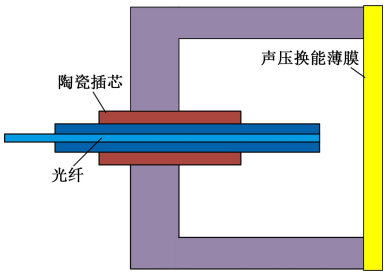


图 1 传感器的结构示意图

整个传感头结构用陶瓷插芯和金属外壳进行固定，使光纤端面和静态下的薄膜平面平行。薄膜的内表面和光纤端面相互平行，构成了光学 FP 腔。

1.2 传感原理

在 FP 腔中，光从光纤入射，在光纤端面处发生折射和反射。折射光继续向前传播进入光学 FP 腔并在腔内反复传播，每次往返，都会在腔面处发生折射和反射，反射光继续在腔内传播，折射光输出到腔外，相邻的输出光束之间相位差恒定，最后多个输出光波相互干涉，形成干涉光。但是由于光纤端面的反射率很低(在不考虑光纤端面镀膜的情况下，通常约为 0.04)，经光纤端面二次反射及以后的光，它们的光强非常弱，可以忽略不计。因此，这个光学 FP 腔结构，其输出的干涉光可以近似为双光束干涉光。干涉光的光场表达式如式(1)所示。其中复振幅 A 如式(2)所示，相位差 δ 如式(3)所示。

$$E = E_1 + E_2 = A\cos(\alpha - \omega t) \tag{1}$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\delta \tag{2}$$

$$\delta = kz' - kz \tag{3}$$

可以得到光纤传感的干涉光谱近似为在一定带宽范围内的三角函数，如式(4)所示。其中 a 和 b 是两个光路之间的光强度和耦合比所决定的两个常数。

$$I(\lambda) = a + b\cos(2\pi d/\lambda) \approx a + b\cos(\beta\lambda) \tag{4}$$

当 FP 腔的腔长被环境参数调制时，光程差也随之变化，干涉光谱将显示波长偏移，其表达式如式(5)所示。

$$T'(\lambda) = a + b\cos(\beta\lambda + \Delta\varphi) \tag{5}$$

利用白光相位解调可以计算出由声波扰动所导致的相位变化 $\Delta\varphi$，从而实现传感。

1.3 相位解调

光纤传感器的干涉光谱近似为在一定带宽范围内的三角函数，如式(4)。当 FP 腔的腔长被环境参数调制时，光程差也随之变化，干涉光谱将显示波长偏移，如式(6)所示。Δd 是光程差的变化量。波长偏移值 $\Delta\lambda$ 的表达式如式(7)所示，在较窄的波长范围内，波长偏移值 $\Delta\lambda$ 可以近似为与波长无关的常数，其中 λ_0 是所用波长范围的中心波长。

$$T'(\lambda) = a + b\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}\cdot(d - \Delta d)\right] = T(\lambda + \Delta\lambda) \tag{6}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda\cdot\Delta d}{d - \Delta d} \approx \frac{\lambda_0\cdot\Delta d}{d - \Delta d} \tag{7}$$

对于 FP 干涉仪，自由光谱范围 FSR 如式(8)所

示。则 FP 腔的腔长受到环境扰动时，自由光谱范围 FSR 的变化 ΔFSR 如等式(9)所示。通常情况下，扰动导致的 Δd 远小于 d，所以 ΔFSR 可以忽略不计。由此可以得到，受扰动后的干涉光谱，只经历恒定的波长偏移，而不产生波形变化。

$$FSR=\lambda^2/d \tag{8}$$

$$\Delta FSR=\lambda_0^2\left(\frac{1}{d-\Delta d}-\frac{1}{d}\right)\ll FSR \tag{9}$$

在实验中，通常获取的光谱数据是离散采样的，则干涉光的光谱函数如式(10)所示，其中 $\Delta\varphi$ 是波长偏移的等效相位变化，采样的波长 λ_j 如式(11)所示，$\Delta\lambda_0$ 是采样间隔。则采样频率 f_s 为 $1/\Delta\lambda_0$。

$$T'(\lambda_j)=T(\lambda_j+\Delta\lambda)=a+b\cos(\beta\lambda_j+\Delta\varphi) \tag{10}$$

$$\lambda_j=\lambda_1+(j-1)\Delta\lambda_0,\quad j=1,2,\cdots,N \tag{11}$$

对于某一光纤传感器结构来说，能量主要分布在少数固有空间频率上，所以相位变化 $\Delta\varphi$ 有望在这些频率下被解调出来。对于离散采样的光谱函数，对其进行快速傅里叶变换(FFT)，得到的傅里叶频谱图，对应点所在的频率如式(12)所示。

$$f_n=\frac{n-1}{N}\cdot f_s=\frac{n-1}{N\cdot\Delta\lambda_0} \tag{12}$$

由此，干涉光谱的表达式可写为式(13)，其中 θ_C 是与初始波长 λ_1 和采样频率 f_s 有关的常数，表达式如式(14)所示。

$$T'(\lambda_j)=a+b\cos(2\pi f_n\lambda_j+\Delta\varphi)=a+b\cdot\cos\left[\frac{2\pi}{N}(j-1)(n-1)+\theta_C+\Delta\varphi\right] \tag{13}$$

$$\theta_C=2\pi\lambda_1 f_n \tag{14}$$

从上述分析可知，要解调出相位变化信息 $\Delta\varphi$，需将光谱函数在 f_n 处进行 FFT 变换，FFT 变换的公式如式(15)所示，式(16)～(18)依次分别是傅里叶变化的实部、虚部和幅度，其中 φ_j 如式(19)所示。

$$F'(f_n)=\sum_{j=1}^{N}T'(\lambda_j)\exp(-2\pi i f_n(j-1)\Delta\lambda_0)=\sum_{j=1}^{N}T'(\lambda_j)\exp\left(-2\pi i\,\frac{(j-1)(n-1)}{N}\right) \tag{15}$$

$$\mathrm{Re}[F'(f_n)]=\sum\nolimits_{j=1}^{N}T'(\lambda_j)\cos(2\pi\varphi_j)=\frac{bN}{2}\cos(\theta_C+\Delta\varphi) \tag{16}$$

$$\mathrm{Im}[F'(f_n)]=-\sum\nolimits_{j=1}^{N}T'(\lambda_j)\sin(2\pi\varphi_j)=-\frac{bN}{2}\sin(\theta_C+\Delta\varphi) \tag{17}$$

$$\mathrm{Am}[F'(f_n)]=\sqrt{\mathrm{Re}^2[F'(f_n)]+\mathrm{Im}^2[F'(f_n)]} \tag{18}$$

$$\varphi_j=\frac{2\pi(n-1)(j-1)}{N},j=1,2,\cdots,N \tag{19}$$

傅里叶相位在空间频率下的余弦和正弦值可以从 FFT 结果的实部和虚部计算出来。如式(20)和(21)所示。

$$\cos\angle F'(f_k)=\frac{\mathrm{Re}[F'(f_k)]}{\mathrm{Am}[F'(f_k)]}=\cos(\theta_C+\Delta\varphi) \tag{20}$$

$$\sin\angle F'(f_k)=\frac{\mathrm{Im}[F'(f_k)]}{\mathrm{Am}[F'(f_k)]}=\sin(\theta_C+\Delta\varphi) \tag{21}$$

将相同的运算用于未扰动的光谱，得到初始傅里叶相位，如式(22)和(23)所示。

$$\cos\angle F(f_k)=\cos\theta_C \tag{22}$$

$$\sin\angle F(f_k)=\sin\theta_C \tag{23}$$

由此可以计算出相位变化 $\Delta\varphi$，如式(24)所示。综上，外界的扰动导致 FP 腔的腔长发生变化，这种信息可以从傅里叶相位变化中解调出来。

$$\Delta\angle F'(f_k)=\Delta\varphi=\tan^{-1}\left\{\left.\frac{\mathrm{Im}[F'(f_k)]\mathrm{Im}[F(f_k)]}{\mathrm{Re}[F'(f_k)]\mathrm{Re}[F(f_k)]}\right/\left(1+\frac{\mathrm{Im}[F(f_k)]\mathrm{Im}[F'(f_k)]}{\mathrm{Re}[F(f_k)]\mathrm{Re}[F'(f_k)]}\right)\right\} \tag{24}$$

2　实验过程和分析

2.1　薄膜的转移

本文采用的薄膜由硅片、光刻胶、铬金薄膜构成。需要将铬金薄膜转移到传感头结构中的金属外壳上。首先将金属外壳的上圆环面打磨并擦拭干净，防止圆环表面的氧化层或灰尘使表面不平整对薄膜的转移造成影响。第二，在环形上表面均匀涂抹一层薄薄的环氧树脂组合胶。第三，将涂有环氧树脂组合胶水的金属外壳倒置在铬金薄膜上，在 80 ℃下保温 90 min，使环氧树脂组合胶水固化，注意固化完成时要让仪器自然冷却以释放热应力。固化完成后，将陶瓷插芯和铬金薄膜相连接的部分浸入丙酮溶液，静置 24 h，使铬金薄膜和硅基分离。

2.2　器件的组装

搭建如图 2 所示组装系统。通过对环形器 3 号口的干涉光进行监测，调节光纤端面和铬金薄膜之间的距离，使其符合光束相互干涉的条件，同时在波

长窗口内有几个周期的干涉条纹。调节好距离后，将陶瓷插芯内芯固定，便完成了传感器的制作。

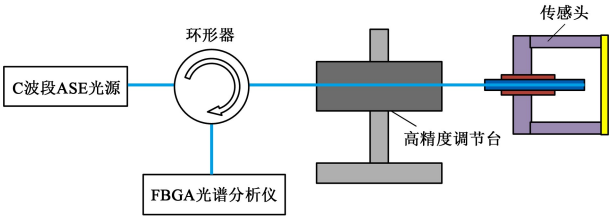
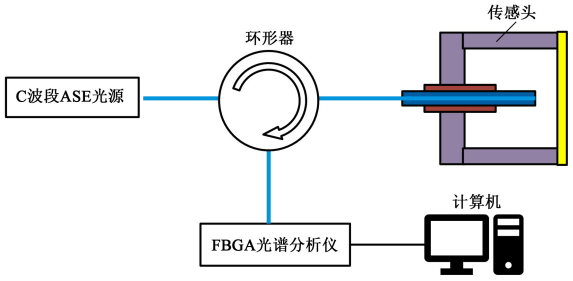


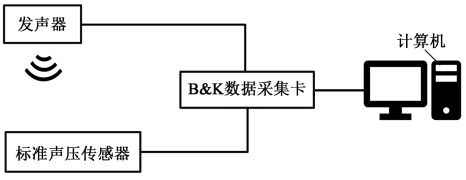
图 2 组装系统示意图

2.3 性能测试

搭建如图 3 所示的测试系统。其中图 3(a)是传感系统，获取传感器的干涉信号；图 3(b)是发声系统，控制声场并将标准数据记录下来，用于与传感器所探测的声波信号进行对比。



(a) 传感系统



(b) 发声系统

图 3 测试系统示意图

传感器所获取的干涉光谱如图 4 所示，对其进行傅里叶变换得到图 5 所示频谱图，图中的峰值即为干涉光谱的固有空间频率。通过计算固有空间频率处的傅里叶相位，其相位变化和声压大小成线性关系，由此实现对声波的探测。

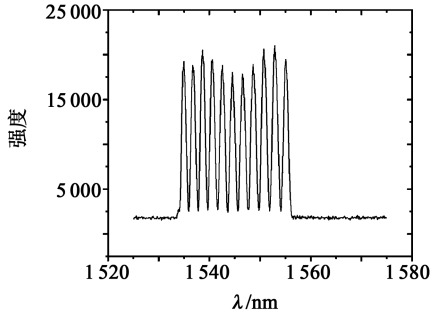


图 4 干涉光谱

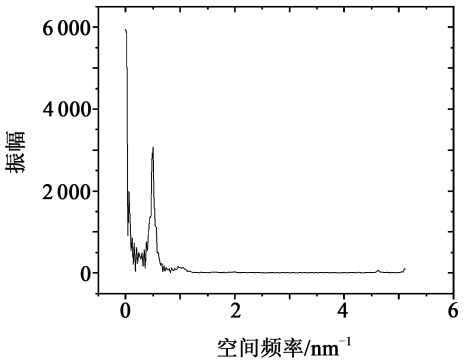


图 5 干涉光谱傅里叶变换图

声波传感器的重要指标有频率响应和声压灵敏度。将光谱的傅里叶相位数据进行傅里叶变换，可得到相位谱在各个频率上的振幅分量，除去直流分量，可以发现在与声波频率相同的频率上，有振幅最大值出现。同时，对标准声压传感器探测声压数据进行相同的处理。将相位变化的最大振幅值和声压的最大振幅值记录下来，并与所设置的调制电压频率对应起来。最后根据式(25)计算出传感器的灵敏度，其中灵敏度的单位为 dB re 1 rad/μPa，相变振幅的单位为 rad，声压振幅的单位为 μPa。利用所获得的不同频率下的传感器灵敏度，绘制的频响曲线如图 6 所示。利用所获得的不同声压下的相位振幅，绘制声压-相位图，并进行直线拟合，如图 7。

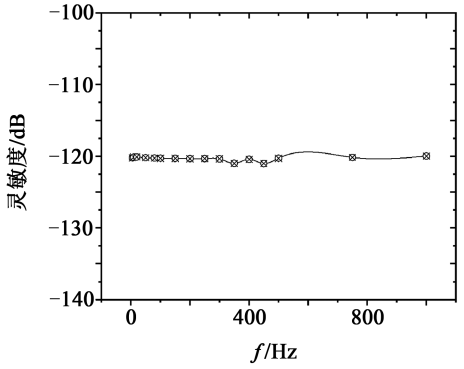


图 6 传感器的频响曲线

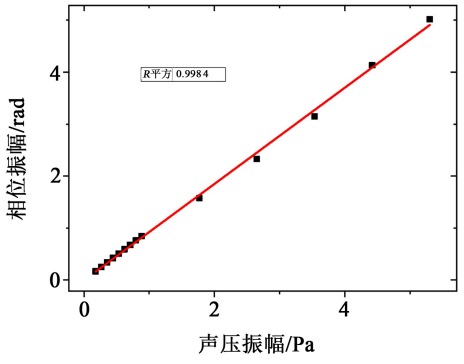


图 7 声压-相位直线

$$n = 20\log_{10}\frac{A_{相变}}{A_{声压}} \tag{25}$$

综上，传感器在声波频率 5～1 000 Hz 的范围内，灵敏度保持在－119.98～－120.99 dB re 1 rad/μPa 范围内，灵敏度变化小于 1.01 dB，具有较宽的响应平坦区间。在 150 Hz，声压 0.18～5.30 Pa 的范围内工作稳定，声压和相位之间的 R^2 为 0.998 4，具有良好的线性度。

3　结论

本文设计了一种基于光学 FP 腔的声波传感器结构，分析了其传感原理，并用实验检测了其关键指标。实验结果表明，传感器在声波频率 5～1 000 Hz 范围内，灵敏度保持在－119.98～－120.99 dB re 1 rad/μPa 范围内，灵敏度变化小于 1.01 dB，具有较宽的响应平坦区间。在 150 Hz，声压 0.18～5.30 Pa 的范围内工作稳定，且声压和相位之间的 R^2 为 0.998 4，具有良好的线性度。

这种传感器在低频、微压等应用场景有着巨大的应用前景。

参考文献：

[1] 刘德明. 光纤光学[M]. 武汉：科学出版社，2016.
Liu Deming. Fiber Optics[M]. Wuhan: Science Press, 2016.

[2] 赵　勇. 光纤传感原理与应用技术[M]. 北京：清华大学出版社，2002.
Zhao Yong. Principles and Application Technology of Optical Fiber Sensors[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[3] 廖延彪. 光纤传感技术与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2009.
Liao Yanbiao. Optical Fiber Sensing Techniques and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

[4] Giallorenzi T G, Jr G H S, Bucaro J A. Optical fiber sensor technology[J]. Microwave Theory & Techniques IEEE Transactions, 1982, 30(4): 472-511.

[5] Imai M, Ohashi T, Ohtsuka Y. High-sensitive all-fiber Michelson interferometer by use of differential output configuration[J]. Opt. Communications, 1981, 39(1/2): 7-10.

[6] Feldmann P A. Construction of a fiber optic gradient hydrophone using a Michelson configuration[J]. J. of the Acoustical Society of America, 1986, 80(2): 700.

[7] 李双佶，梁景舒，王福娟，等. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的单模光纤声波传感器的研究[J]. 大学物理，2011，30(6)：52-56.
Li Shuangji, Liang Jingshu, Wang Fujuan, et al. Experiment of a single-mode fiber acoustic sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. College Physics, 2011, 30(6): 52-56.

[8] Lim T K, Zhou Y, Lin Y, et al. Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation[J]. Opt. Communications, 1999, 159(4/6): 301-308.

[9] 廖　浩. 薄膜型光纤声波传感器的设计制备与信号解调研究[D]. 武汉：华中科技大学，2018.
Liao Hao. Design, fabrication and signal demodulation of thin film fiber optic acoustic sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[10] Li S, Yu B, Wu X, et al. Low-cost fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometer based on a polyethylene diaphragm for vibration detection[J]. Opt. Communications, 2020, 457: 124332.

[11] Maciak E. Low-coherence interferometric fiber optic sensor for humidity monitoring based on Nafion thin film[J]. Sensors, 2019, 19(3): 629.

[12] Zhou X, Ma F, Ling H, et al. A compact hydrogen sensor based on the fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. Opt. Laser Technol., 2020, 124: 105995.

[13] Costa G K B, Gouvêa P M P, Soares L M B, et al. In-fiber Fabry-Perot interferometer for strain and magnetic field sensing[J]. Opt. Express, 2016, 24: 14690-14696.

[14] Yang Y, Zhang X, Bai H, et al. Force sensors based on intrinsic fiber Fabry-Perot interferometer fabricated by the femtosecond laser[C]// 2016 Asia Communications and Photonics Conf., 2016: paper AS3E.3.

[15] Yuan L, Huang J, Lan X, et al. All-in-fiber optofluidic sensor fabricated by femtosecond laser assisted chemical etching[J]. Opt. Lett., 2014, 39: 2358-2361.

作者简介：

翟　杰(1999－)，男，安徽省合肥市人，硕士研究生，主要从事光通信和光网络的研究；

鲁　平(1973－)，女，博士，华中科技大学“华中卓越学者”特聘教授，博士生导师；OSA 高级会员，IEEE 高级会员，IEEE 女工程师武汉分会主席，中国光学学会高级会员，中国传感器与物联网产业联盟能源工业传感器与应用技术专委会副主任委员，中国仪器仪表行业协会在线分析仪器分会专家委员；先后主持和承担国家重点研发计划项目、国家自然科学基金、重大科学仪器设备开发专项等项目；主要从事高精度声光探测方面的研究；已发表论文 80 余篇，授权国家发明专利 28 项，获批软件著作权 5 项；先后获得国家科技进步二等奖、湖北省科学技术发明二等奖 2 次，中国通信学会科学技术一等奖及二等奖、中国光学工程学会科技创新一等奖等科研奖励。