

# 组合磁光光纤光栅的磁场敏感性分析

武保剑

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**磁光光纤光栅是一种具有磁光效应的特殊光栅,可直接用于本征型的磁场传感或通过磁控的方式实现可调光子信息处理。该文采用分段均匀模型分析了几种组合磁光光纤Bragg光栅中左右旋圆偏振光的偏振相关损耗对磁场的敏感性,计算表明,均匀磁光光纤光栅的中心区段对磁场最为敏感。提出了一种比均匀磁光光栅更加灵敏的F-P型组合光栅传感结构,可更好地用于较弱磁场下偏振相关损耗的检测。

**关键词** Faraday效应; 光纤Bragg光栅; 磁场测量; 偏振相关损耗

中图分类号 O43

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.021

## Magnetic Field Sensitivity of Sectional Magneto-Optic Fiber Gratings

WU Bao-Jian

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks of Ministry of Education,

University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Magneto-optic fiber gratings are a class of special fiber gratings with magneto-optical effects, which are useful for intrinsic magnetic field sensing and realizing magnetic controlled photonic information processing. The magnetic field sensitivity of polarization-dependent loss for left-/right-handed circularly polarized light in sectional magneto-optic fiber Bragg gratings (MFBGs) is analyzed by using the piecewise-uniform grating model and it is shown that the central section of uniform MFBGs is most sensitive to magnetic field. The F-P structure of sectional MFBGs is presented, which is superior to the corresponding uniform MFBGs for measuring the polarization-dependent loss in the range of small magnetic field.

**Key words** Faraday effect; fiber Bragg gratings; magnetic field measurement; polarization-dependent loss

磁光光栅是一类具有磁光效应的光栅波导结构,具有比传统光栅更加丰富的光信息处理功能。根据导波光的微扰理论,磁光效应可归结为相对附加介电系数张量 $\Delta\epsilon$ ,非对角元素的磁化强度依赖特性,而光栅表现为 $\Delta\epsilon$ 元素对某参量的周期性变化。磁光光栅一般分为磁光折射率光栅<sup>[1]</sup>和磁化强度光栅<sup>[2]</sup>(或者是它们的复合结构),它们分别对应于 $\Delta\epsilon$ 对角元素的折射率周期变化和非对角元素的磁化强度周期变化。光纤波导结构的磁光光栅可称为磁光光纤光栅,如在光纤Bragg光栅中掺入稀土元素或在拉制的YIG光纤<sup>[3]</sup>上写入Bragg光栅等方法可获得这种光纤结构,称之为磁光光纤Bragg光栅(magneto-optic fiber Bragg grating, MFBG)<sup>[4]</sup>。磁光光纤光栅作为一种新型的智能光导结构,不但具有传统光纤光栅的功能,还可以通过外加磁场改变光纤光栅中导波光的传输特性,进而借助于磁光Faraday效应实现

磁场传感<sup>[5-6]</sup>,或利用带隙可调性实现多种光子信息处理<sup>[7-8]</sup>。然而,目前市场上很难获得具有较大磁光系数的理想磁光光纤光栅,幸运的是普通光纤中或多或少地存在法拉第效应,只是这种效应相对较弱,通常需要采用灵敏度较高的磁场检测方法,其中偏振相关损耗测量被认为是相当有效的<sup>[9-10]</sup>。本文将通过改变外加磁场施加方式来分析几种组合磁光光纤光栅偏振损耗特性,进而探索有效提高磁场敏感性的新型光纤光栅结构,有助于普通光纤光栅在本征型磁场传感中的应用。

### 1 磁光光纤光栅的分段均匀模型

磁光光纤光栅不同于传统光纤光栅的特点是需要考虑光栅的磁光效应,从而导致磁光光纤光栅的本征模不再是线偏振光而是圆偏振光,因此本文一方面考虑左右旋圆偏振光的透射/反射特性,线偏振

收稿日期: 2009-06-03

基金项目: 国家863计划(2009AA01Z216)

作者简介: 武保剑(1970-),男,博士,教授,主要从事光纤通信方面的研究。

光特性可容易地通过左右旋圆偏振光的分合加以分析。另一方面,本文中所谓的组合磁光光栅是指由至少一段磁光光栅参与形成的复合光栅结构,主要依赖于磁场的分布,如图1所示。分段均匀光栅模型是将整个光纤光栅分成若干个均匀光栅段,每段内包括多个光栅周期且均匀磁化,然后利用各段之间的转移矩阵来分析磁光光纤光栅中圆偏振光的稳态传输特性。由于通常情形下所施加的直流磁场区域远大于光栅周期,因此分段均匀光栅模型是有效的。首先,把一个长度为 $L$ 的光栅分成 $N$ 个足够小的单元区间,每个单元的步长为 $h=L/N$ ,如图1所示。对于每一段均匀的Bragg磁光光栅段,将其光场表示为

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} A_R^+(z) \\ A_R^-(z) \\ A_L^+(z) \\ A_L^-(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(\delta + \kappa_m) & i\kappa_g & 0 & 0 \\ -i\kappa_g & -i(\delta + \kappa_m) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i(\delta - \kappa_m) & i\kappa_g \\ 0 & 0 & -i\kappa_g & -i(\delta - \kappa_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_R^+(z) \\ A_R^-(z) \\ A_L^+(z) \\ A_L^-(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\delta = n_{av}k_0 - \pi/\Lambda$ ;  $\kappa_g = k_0\Delta n_1 > 0$ ;  $\kappa_m = V_B B$ ;  $\Lambda$  和  $2\Delta n_1$  分别为光栅的周期和折射率调制幅度;  $V_B = 1.59 \times 10^{-33} \text{v}^2 \text{rad}/(\text{Gs} \cdot \text{m})$  为Verdet常数<sup>[12]</sup>;  $B$  为外加磁感应强度;光频率 $\nu$ 以Hz为单位;  $n_{av}$  为光纤平均折射率。由式(1)可得  $z = z_{n-1}$  与  $z = z_n$  之间的复

$$T_{n,n-1} = \frac{1}{q_R} \begin{bmatrix} q_R \cos(q_R h) + i\delta_R \sin(q_R h) & i\kappa_g \sin(q_R h) \\ -i\kappa_g \sin(q_R h) & q_R \cos(q_R h) - i\delta_R \sin(q_R h) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $\delta_R = \delta + \kappa_m$ ;  $q_R = \sqrt{(\delta_R)^2 - \kappa_g^2}$ ; 对于非光栅段,  $\kappa_g = 0$ ;  $q_R = \delta_R$ 。式(3)可以进一步简化。于是可得  $z = 0$  和  $z = L$  边界处的复振幅之间的关系:

$$\begin{bmatrix} A_R^+(L) \\ A_R^-(L) \end{bmatrix} = T_{N,N-1} \cdots T_{n,n-1} \cdots T_{3,2} T_{2,1} T_{1,0} \begin{bmatrix} A_R^+(0) \\ A_R^-(0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此,关键是计算总传输矩阵  $T = T_{N,N-1} \cdots T_{n,n-1} \cdots T_{3,2} T_{2,1} T_{1,0}$ 。

当导波光只从前端  $z = 0$  入射时,即  $A_R^+(0)$  已知;再考虑到在光栅结束区 ( $z = L$ ) 不可能产生新的后向光波,有边界条件  $A_R^-(L) = 0$ , 于是由式(4)可得右旋圆偏振光的透射系数  $t_R$  与反射系数  $r_R$ :

$$t_R = \frac{A_R^+(L)}{A_R^+(0)} = T_{11} - \frac{T_{12}T_{21}}{T_{22}} \quad (5a)$$

$$r_R = \frac{A_R^-(0)}{A_R^+(0)} = -\frac{T_{21}}{T_{22}} \quad (5b)$$

式中  $T_{kl}(k,l=1,2)$  为总传输矩阵  $T$  的矩阵元素。将上面各式中有关参量的下标R换为L,便可以得到左旋圆偏振光的透射系数  $t_L$  与反射系数  $r_L$ , 如

$E_j^{(s)}(z,t) = A_j^{(s)}(z)e^{i(s\beta_B z - \omega t)}$  形式,  $A_j^{(s)}(z)$  为复振幅,下标  $j = R,L$  分别表示右旋和左旋圆偏振光,上标  $s = \pm 1$  表示导波光传播方向。复振幅之间的耦合关系为<sup>[11]</sup>:

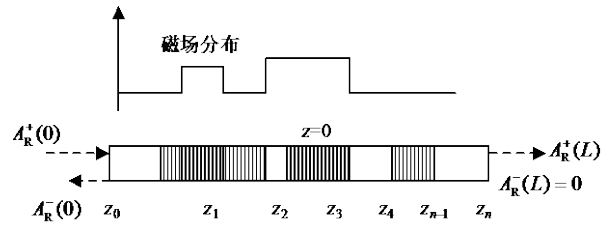


图1 组合光纤光栅中圆偏振光的传输模型

振幅递推关系为:

$$\begin{bmatrix} A_R^+(z_n) \\ A_R^-(z_n) \end{bmatrix} = T_{n,n-1} \begin{bmatrix} A_R^+(z_{n-1}) \\ A_R^-(z_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $T_{n,n-1}$  为传输矩阵<sup>[11]</sup>, 即:

$$q_L = \sqrt{(\delta_L)^2 - \kappa_g^2}, \text{ 其中 } \delta_L = \delta - \kappa_m.$$

由式(5)可计算圆偏振光的透射率与反射率,也可进一步计算组合光纤光栅系统的偏振相关损耗:

$$\text{PDL} = \left| 10 \lg \left| \frac{t_R}{t_L} \right|^2 \right| \quad (6)$$

## 2 组合磁光光纤Bragg光栅的偏振相关损耗计算

本文考虑如下3种组合磁光光纤Bragg光栅结构,如图2所示,其中  $L_M$  和  $L_N$  分别为磁光光栅段与非磁光光栅段的长度,  $L$  为组合光栅的总长度。

### 2.1 MN型组合光纤光栅

MN型组合光纤光栅是由均匀光纤光栅(光栅周期恒定)一端置于均匀磁场形成的,如图2a所示。根据式(6)计算的偏振相关损耗谱以及相应的参数取值,如图3所示。可见偏振相关损耗的峰值与磁场之间具有一一对应关系。组合光栅总长度一定时,该峰值对磁光光纤光栅长度  $L_M$  的依赖曲线如图4所示;整个组合光栅全部置于磁场时峰值偏振相关损

耗达到最大, 此时它对组合光栅长度的依赖如图5所示, 传感光栅长度越大峰值也越大。计算还表明, 组合光纤光栅输入/输出端的非光栅区域长度对偏振相关损耗谱没有影响, 现实情况亦确实如此。

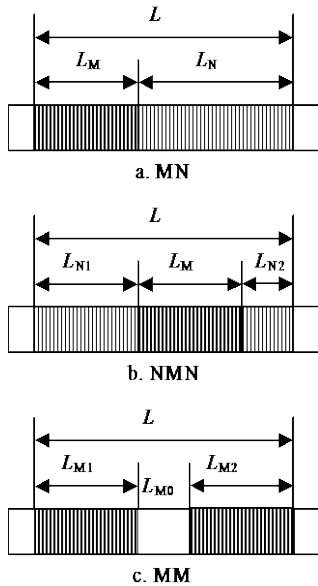


图2 3种类型的组合光纤光栅

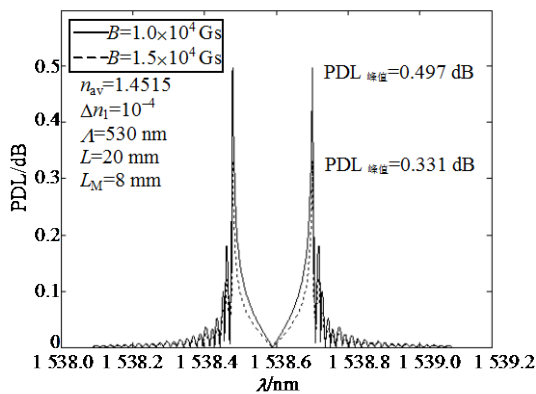


图3 MN型组合光纤光栅的偏振相关损耗谱

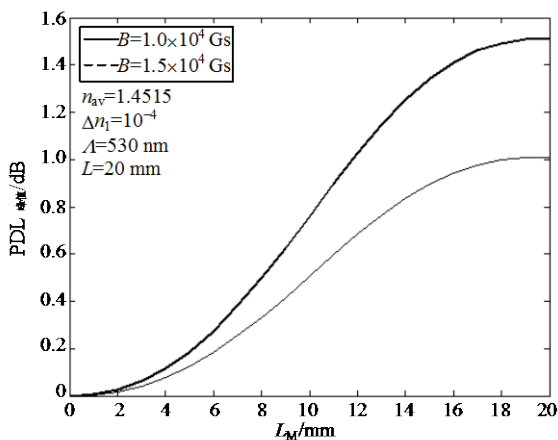


图4 MN型组合光纤光栅的峰值偏振相关损耗

## 2.2 NMN型组合光纤光栅

NMN型组合光纤光栅也是在均匀光纤光栅上施加磁场形成的, 如图2b所示。在磁光光栅段长度和组合光栅总长度保持不变的情形下, 磁场施加位置对偏振相关损耗峰值的影响如图6所示, 表明光纤光栅的正中间对磁场最为敏感, 此时可以获得最大的峰值偏振相关损耗。

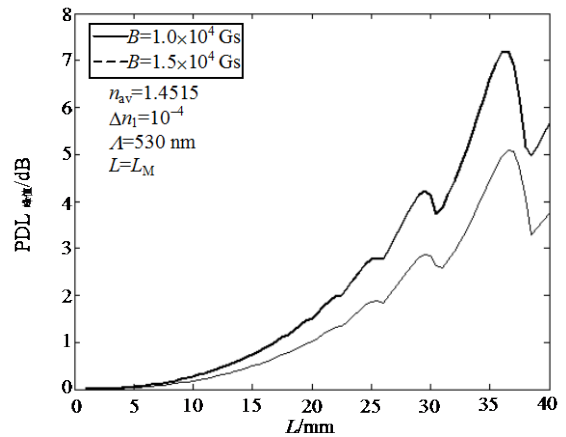


图5 峰值偏振相关损耗对组合光栅长度的依赖

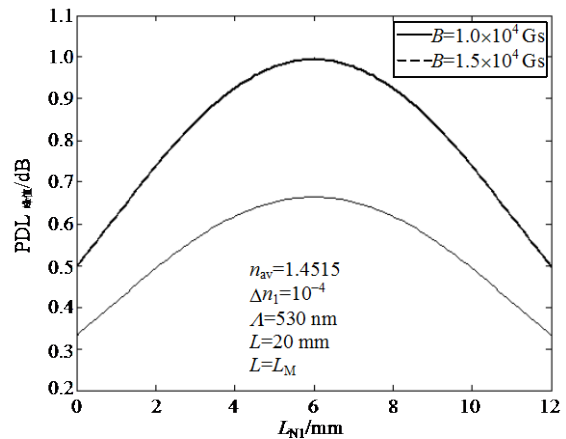


图6 NMN型组合光纤光栅的峰值偏振相关损耗曲线

## 2.3 MM型组合光纤光栅

MM型组合光纤光栅是由两段分开的均匀光纤光栅组成, 如图2c所示。这里仅考虑整个组合光纤光栅置于均匀磁场的情形, 且两段光栅具有相同的光栅周期。当中间部分也为相同周期的光栅时, 它相当于将整个均匀光栅置于磁场的情形 (with grating), 即完全均匀磁光光栅; 否则就是没有光栅的情形 (without grating), 两者的偏振相关损耗谱如图7所示, 图8为相应的左右旋圆偏振 (RCP/LCP) 光透射谱。显然, MM型组合光纤光栅的偏振相关损耗谱出现了多峰结构且具有更大的峰值, 它与两段光栅之间形成的F-P腔多次反射有关, 因此称之为F-P型组合光栅。

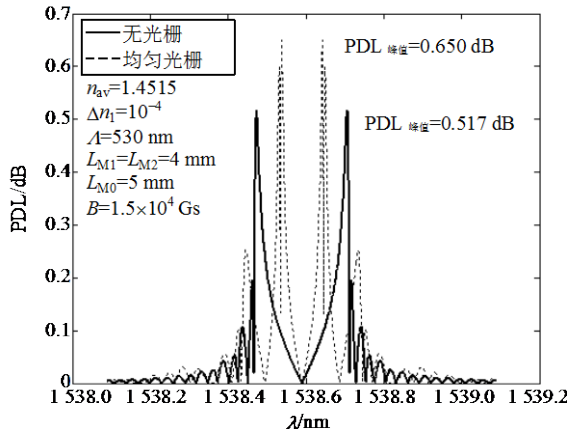


图7 MM型组合光纤光栅的偏振相关损耗谱

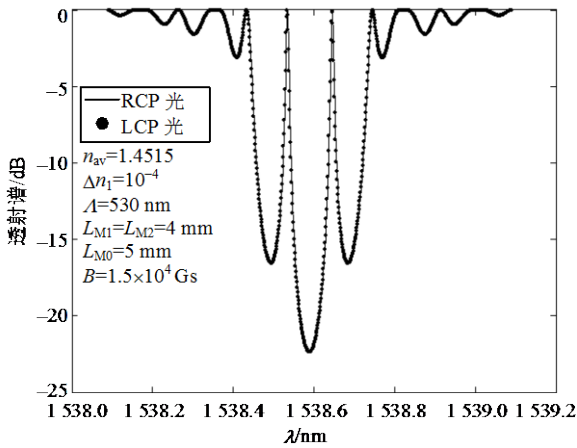


图8 左右旋圆偏振(RCP/LCP)光的透射谱

### 3 F-P型组合光栅与均匀磁光光栅的磁场敏感性分析

由以上分析可知, 根据MM型磁光光栅中间部分是否为光栅, 可分为均匀磁光光栅和F-P型组合光栅两种情形, 它们的峰值偏振相关损耗对中间长度  $L_{M0}$  的依赖如图9所示。由图9可知, 在适当的  $L_{M0}$  长度范围内, F-P型组合光栅的峰值偏振相关损耗大于均匀磁光光栅情形。

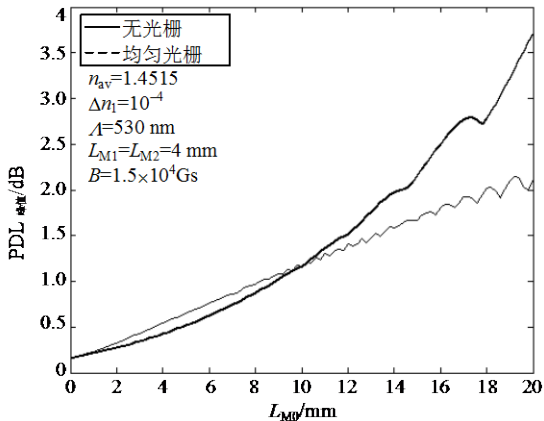


图9 峰值偏振相关损耗对中间长度  $L_{M0}$  的依赖

图10给出了  $L_{M0} = 5 \text{ mm}$  时两种情形下峰值偏振相关损耗对磁场的敏感特性, 小磁场范围内, 峰值偏振相关损耗与磁场大小近似成正比。在  $10^4 \text{ Gs}$  的磁场范围内, F-P型组合光栅的磁场敏感性是均匀磁光光栅情形的1.26倍以上, 达到  $4.34 \times 10^{-5} \text{ dB/Gs}$ ; 增加组合光栅长度, 灵敏度还可以进一步提高。

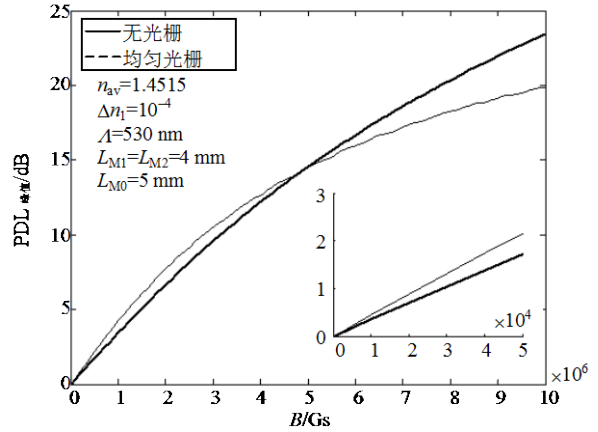


图10 峰值偏振相关损耗对磁场的敏感特性

### 4 结束语

本文考察了几种由磁场引起的不均匀磁光光纤光栅结构, 它们实际上对应于光纤光栅在置于磁场过程中所处的不同位置。根据均匀磁光光纤Bragg光栅的耦合模理论, 采用分段均匀光栅模型, 分析了组合光纤光栅的偏振相关损耗对磁场的敏感特性, 指出了磁场施加位置对峰值偏振相关损耗的影响, 也比较了均匀磁光光纤光栅与F-P型组合光纤光栅的磁场灵敏性, 后者在小磁场范围具有优势, 适合于目前磁光效应较弱的光纤光栅情形。

### 参 考 文 献

- [1] MAEDA A, SUSAKI M. Magnetostatic wave propagation in yttrium iron garnet with microfabricated surfaces[J]. IEEE Transactions of Magnetics, 2006, 42(10): 3096-3098.
- [2] 文 峰, 武保剑. 磁化强度光栅中导波光传播特性分析[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 351-354. WEN Feng, WU Bao-jian. Analysis of the propagation characteristic of guided optical waves in the 'magnetization grating'[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(4): 351-354.
- [3] MAO T C, CHEN J C, HU C C. Effect of the pulling rate on the quality of cerium-substituted YIG single-crystal fibers by LHPG[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 296: 110-116.
- [4] WU Bao-jian, LIU Xiao, QIU Kun. Characteristics of magneto-optic fiber Bragg gratings for use in optical signal processing[J]. Optical Fiber Technology, 2009, 15(2): 165-171.
- [5] KERSEY A D, MARRONE M J. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe[C]//Tenth International

- Conference on Optical Fibre Sensors, Proceeding of SPIE. [S. l.]: SPIE, 1994, 2360: 53-56.
- [6] WU Bao-jian, YANG Ying, QIU Kun. Magneto-optic fiber Bragg gratings with application to high-resolution magnetic field sensors[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2008, 6(4): 423-425.
- [7] ARCE-DIEGO J L, LÓPEZ-RUISÁNCHEZ R, LÓPEZ-HIGUERA J M, et al. Fiber Bragg grating as an optical filter tuned by a magnetic field[J]. Optics Letters, 1997, 22(9): 603-605.
- [8] 邱 昆, 武保剑, 文 峰. 磁光光纤Bragg光栅中圆偏振光的非线性传输特性[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1726-1730.
- QIU Kun, WU Bao-jian, WEN Feng. Nonlinear propagation of circularly polarized light in magneto-optic fiber Bragg gratings[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1726-1730.
- [9] OH S, HAN W, PAEK U, et al. Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect[J]. Optics Express, 12(4): 724-729.
- [10] PENG Hui, SU Yang, LI Yu-quan. Analysis of a new measurement for electromagnetic with fiber grating[C]// Proceeding of SPIE, Passive Components and Fiber-based Devices V. [S. l.]: SPIE, 2008.
- [11] 武保剑. 微波磁光理论与磁光信号处理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2009.
- WU Bao-jian. Theory of microwave magneto-optics and magneto-optical signal processing[M]. Chengdu: University of Electronic of Science and Technology of China Press, 2009.
- [12] NODA J, HOSAKA T, SASAKI Y, et al. Dispersion of Verdet constant in stress-birefringent silica fibre[J]. Electronics Letters, 1984, 20(22): 906-908.

### 编辑 税 红



武保剑, 教授, 博士生导师。主要从事光器件、光纤通信、光信息处理等方面的基础研究, 发表论文70篇, 著有《微波磁光理论与磁光信号处理》一书。近5年来, 主持国家自然科学基金项目2项、国家863探索导向类项目1项、新世纪优秀人才支持计划项目1项, 作为第二项目负责人参与国家863项目和四川省应用基础研究项目等。2007年获四川省科学技术二等奖1项(排名第三)。