

基于稳频激光的超窄线宽 π 相移光纤 布拉格光栅应变测量*

于波^{1)†} 银振强²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ 丁伟杰¹⁾ 刘伟新¹⁾ 李静¹⁾

1) (忻州师范学院物理系, 忻州 034000)

2) (中国科学技术大学, 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026)

3) (中国科学技术大学, 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 合肥 230026)

4) (中国科学技术大学, 合肥国家实验室, 合肥 230088)

5) (中国科学技术大学, 量子网络安徽省重点实验室, 合肥 230026)

(2025 年 5 月 30 日收到; 2025 年 7 月 11 日收到修改稿)

超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅在光纤传感领域发挥着重要的作用, 但是这种超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅对输入光强度非常敏感, 输入光在光栅内部产生光热效应会引起频率移动, 降低了光栅的测量精度, 同时激光器自身的频率漂移也会增大测量误差. 本文提出使用超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅进行高精度应变测量的方法, 采用单光子调制技术锁定激光频率到 38 MHz 超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅, 同时消除了光栅内部光热效应和激光频率起伏对应变测量的影响, 对于 0—30 $\mu\epsilon$ 范围的外部应变实现了测量精度为 0.05 $\mu\epsilon$ 的高精度测量, 该方法在航空航天、土木工程、能源工程等领域具有重要应用价值.

关键词: 应变测量, π 相移光纤布拉格光栅, 频率锁定, 光热效应, 单光子调制

PACS: 07.10.Pz, 07.85.Fv, 14.70.Bh

DOI: 10.7498/aps.74.20250701

CSTR: 32037.14.aps.74.20250701

1 引言

光纤布拉格光栅具有抗电磁干扰、电无源操作、多点传感、耐腐蚀、体积紧凑等特点, 是理想的传感监测器件^[1-5]. 具有超窄线宽透射峰的 π 相移光纤布拉格光栅常用于测量折射率、压力、超声波、应力、温度等物理参数^[6-12], 考虑到激光器自身存在频率漂移, 通常需要将激光器进行频率锁定进而压缩频率起伏, 之后通过监测 π 相移光纤布拉格光栅的布拉格波长移动量便可测量外部物理参数^[13-17]. 但是, 由于超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅的中心存在 π 相位突变^[18], 所以可以将这种 π

相移光纤布拉格光栅看作“Fabry-Pérot 腔”, 当外部激光输入 π 相移光纤布拉格光栅时, 激光在光栅中心位置积聚的强度很高, 光栅吸收部分光能后转换为热量对光栅产生加热作用导致布拉格波长发生移动^[19], 频率移动量与输入光强成正比, 1 mW 输入光引起的波长移动在 pm 量级^[20,21], 最终降低了这种超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅的测量准确度. 我们曾采用单光子输入光消除了光栅内部光热效应的影响, 将 π 相移光纤布拉格光栅的波长移动转换为时域色散信号移动用于测量外部温度变化^[22], 但是激光器自身频率漂移会降低 π 相移光纤布拉格光栅的测量精度, 不适用于对物理参数进行高精度测量的场合.

* 山西省基础研究计划 (批准号: 202403021211084) 和忻州市科技计划项目 (批准号: 20240509) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yb@xztu.edu.cn

本文利用单光子调制技术实时锁定激光频率到 38 MHz 超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅, 同时消除了光栅内部光热效应和激光频率漂移对应变测量的影响, 利用超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅对 0—30 $\mu\epsilon$ 范围的外部应变实现了高精度测量.

2 光纤布拉格光栅测量应变原理

对光纤纤芯的折射率进行周期性调制即可制作成光纤光栅, 共振波长称为布拉格波长. 光栅布拉格波长取决于光纤有效折射率和光栅周期, 可以表示为 $\lambda = 2n\Lambda$, 其中 λ 为布拉格波长, n 为光纤有效折射率, Λ 为折射率调制周期. 外界应力和温度变化会改变光纤有效折射率和光栅周期, 从而引起布拉格波长发生变化. 如果光栅工作温度保持恒定不变, 那么应力变化引起的布拉格波长移动可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = 2n \frac{\partial\Lambda}{\partial\epsilon} + 2\Lambda \frac{\partial n}{\partial\epsilon}, \quad (1)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为布拉格波长移动量, $\Delta\epsilon$ 为应力变化量. 对 (1) 式进行化简得到

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = \lambda \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial\epsilon} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial\epsilon} \right), \quad (2)$$

式中, $\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial\epsilon}$ 表示光纤中光栅周期随应力的变化, 由于光纤中光栅周期的改变与应力变化相等, 因此这一项等于 1. $\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial\epsilon}$ 表示光纤有效折射率随应力的变化, 这代表光栅的光-弹性系数. 最终应力变化引起的布拉格波长移动可以表示为

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - p_e)\Delta\epsilon, \quad (3)$$

式中, p_e 为有效应力-光常数. 此时布拉格波长移动与外部应力变化呈线性对应关系, 据此通过监测布拉格波长移动量便可测量外部应力变化.

3 实验装置

基于稳频激光的超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅应变测量实验装置如图 1 所示, 1550 nm 频率可调谐激光器输出经典强光首先进入隔离器, 隔离器的作用是防止后路光学器件表面的反射光进入激光器影响其工作稳定性, 之后激光强度经衰减器调节至单光子量级, 即对应门控单光子探测器 (Quantum, QCD-300) 的每个探测门内约有 0.1 个光子.

锁相放大器 (Stanford Research Systems, SR830) 采用相敏检测技术抑制噪声从而提取微弱信号, 其包含信号通道、参考通道、混频器、低通滤波器和放大器等, 参考通道输出 9 kHz 正弦波信号通过高压放大器加载到激光器的压电换能器端口, 通过调节谐振腔长度实现周期性调制激光输出频率, 频率调制的单光子信号经过精确控温的 π 相移光纤布拉格光栅选频后转化为强度调制的单光子信号输出, 单光子探测器探测单光子信号强度并转换为数字脉冲信号输入锁相放大器的信号通道, 之后经过放大和滤波处理后进入混频器. 参考通道输出另一路 9 kHz 正弦波信号经过移相后也输入混频器, 两路信号经过混频、低通滤波和放大处理后即可得到对应于 π 相移光纤布拉格光栅透射峰的误差信号, 误差信号幅度正比于激光频率和 π 相移光纤布拉格光栅共振频率之间的差异, 通过调节锁相放大器的积分时间和滤波斜率并选择合适的参考通道相位使误差信号的信噪比最大. 伺服系统对误差信号进行优化后通过高压放大器加载到激光器的压电换能器端口连续调节输出频率, 最终将单光子频率实时锁定到 π 相移光纤布拉格光栅的布拉格频率.

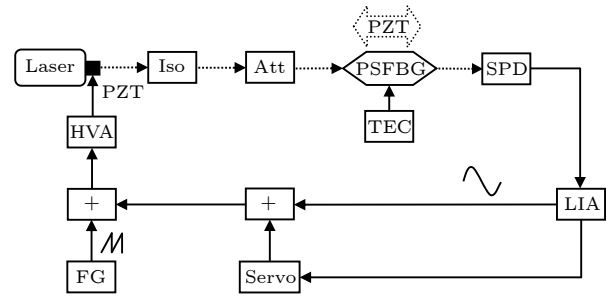


图 1 基于稳频激光的超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅应变测量实验装置图 (虚线代表光信号, 实线代表电信号). Iso, 隔离器; Att, 衰减器; PSFBG, π 相移光纤布拉格光栅; PZT, 压电换能器; SPD, 单光子探测器; TEC, 温控器; +, 加法器; LIA, 锁相放大器; FG, 信号发生器; HVA, 高压放大器
Fig. 1. Experimental setup for strain measurement by using π -phase-shifted fiber Bragg grating with an ultra-narrow linewidth based on frequency-stabilized laser (dashed lines for the light signal, solid lines for the electrical signal). Iso, isolator; Att, attenuator; PSFBG, π -phase-shifted fiber Bragg grating; PZT, piezoelectric transducer; SPD, single-photon detector; TEC, temperature controller; +, adder; LIA, lock-in amplifier; FG, function generator; HVA, high-voltage amplifier.

实验中使用的单光子探测器是钢镓砷雪崩光电二极管, 通常工作在盖革模式下即加载反向偏压到光电二极管的 P-N 结, 入射单光子被 P-N 结吸

收后通过雪崩倍增效应形成可检测的光电流, 采用门控模式主动关闭雪崩效应, 单光子探测器的外触发门控频率为 30 MHz, 1550 nm 波段单光子的探测效率为 16%. π 相移光纤布拉格光栅采用相位掩模法制作而成, 利用负反馈系统精确控制光栅的工作温度, 同时将光栅放置于外部密封的温控箱中进行二次控温并做隔声隔振处理, 进一步提高了光栅工作的稳定性. 利用环氧树脂胶将 π 相移光纤布拉格光栅粘贴在压电换能器上, 压电换能器的伸缩量与外部电压大小成正比, 将外部控制电压加载到压电换能器通过控制其长度调节光栅受到的应力以 $4 \mu\epsilon$ 为步长均匀变化, 改变了光栅周期和光纤有效折射率引起布拉格波长移动, 误差信号快速调节压电换能器将激光频率实时锁定到新布拉格频率, 频率锁定激光和独立参考激光拍频可以获得实时光栅布拉格波长大小, 将外部应力和布拉格波长建立对应关系, 即可利用 π 相移光纤布拉格光栅监测外部应力变化.

4 结果与讨论

π 相移光纤布拉格光栅的透射光谱如图 2(a) 所示, 阻带宽度约为 250.8 GHz, 由于在阻带中心存在 π 相位跳变, 因此出现分别对应于保偏光纤慢轴和快轴的两个透射峰, 慢轴透射峰如图 2(b) 所示, 线宽为 38 MHz, 这里利用慢轴透射峰监测外部应力变化.

实验中, 采用单光子调制技术通过高频调制 ($f = 9$ kHz) 单光子信号的分布概率, 避免了系统低频闪烁噪声的影响. 这里锁相放大器的积分时间设置为 300 μs , 滤波斜率设置为 18 dB, 对应的滤波带宽为 312.5 Hz, 锁相放大器只选择性提取以 9 kHz 调制频率为中心的 312.5 Hz 滤波带宽内单光子的幅度和相位信息, 滤除位于 312.5 Hz 滤波带宽以外的噪声, 从而提高了单光子计数的信噪比, 利用锁相放大器输出的误差信号实时锁定激光频率与 38 MHz 超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅的布拉格频率保持一致. 激光频率未锁定与锁定的测量结果如图 3 所示, 插图为锁定激光频率使用的误差信号, 误差信号的信号噪声比优化为 34. 从图 3 可以看到激光频率未锁定时, 由于外部环境噪声引起激光频率随机漂移, 当激光频率锁定后, 负反馈系统有效抑制了环境扰动, 在 1000 s 内激光频率起伏压缩至 4 MHz.

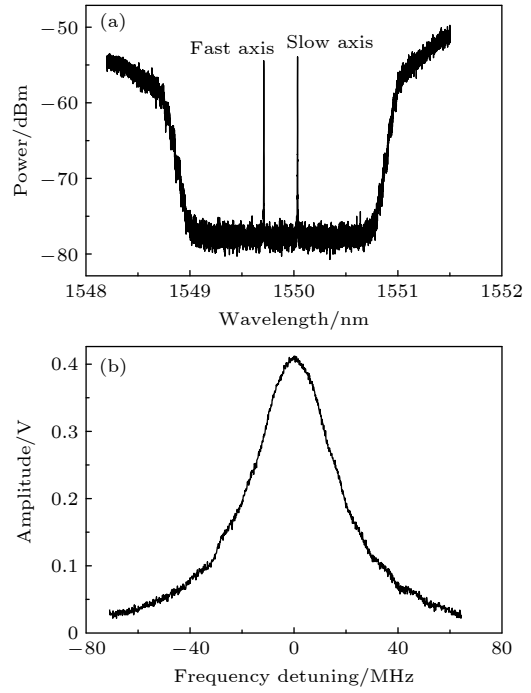


图 2 (a) π 相移光纤布拉格光栅透射光谱; (b) 慢轴透射峰
Fig. 2. (a) The π -phase-shifted fiber Bragg grating transmission spectrum; (b) transmission peak for slow axis.

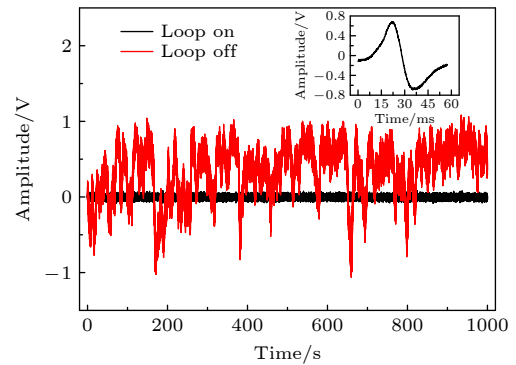


图 3 激光频率未锁定与锁定的测量结果, 插图为误差信号
Fig. 3. Measurement results when laser frequency is un-locked and locked, and inset is error signal.

布拉格波长随外部应力变化的测量结果如图 4 所示, 当外部应力在 0—30 $\mu\epsilon$ 范围内逐渐增大时, 布拉格波长发生红移, 重复应变测量 10 次并通过线性拟合得到相关系数为 $R^2 = 0.997$, 意味着 π 相移光纤布拉格光栅的布拉格波长对 0—30 $\mu\epsilon$ 范围内的外部应变表现出较好的线性响应. 布拉格波长对外部应变的响应灵敏度为 1.2 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 标准误差为 0.023 $\text{pm}/\mu\epsilon$, 这里考虑环境温度波动引起的布拉格波长随机漂移和独立参考激光的频率起伏等因素, 实际光谱的总测量不确定度为 0.056 pm , 则相应的应变测量精度为 0.05 $\mu\epsilon$.

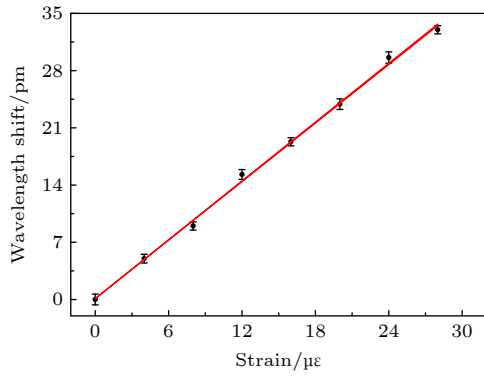


图 4 布拉格波长随外部应力变化的测量结果

Fig. 4. Measurement results of Bragg wavelength variation with external strain.

5 结 论

本文提出使用超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅进行高精度应变测量的方法, 采用单光子调制技术锁定激光频率到 38 MHz 超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅, 同时消除了光栅内部光热效应和激光频率起伏对应变测量的影响, 基于 38 MHz 超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅对 0—30 $\mu\epsilon$ 范围外部应变实现了测量精度为 0.05 $\mu\epsilon$ 的高精度测量, 布拉格波长对外部应变的响应灵敏度为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$, 该方法在航空航天、土木工程、能源工程等领域具有重要应用价值。

参考文献

- [1] Sun Q Q, Zhang M Z, Zhao S S, Ji L T, Su J, Xu J, Yang B, Wu C 2025 *Opt. Lasers Eng.* **194** 109147
- [2] Kok S P, Go Y L, Wang X, Wong M L D 2024 *IEEE Sensors*

- J.* **24** 29485
- [3] Abdulraheem M I, Xiong Y, Zhang W, Chen H, Zhang H, Hu J 2024 *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **25** 1499
- [4] Xu S Y, Li X Z, Wang T Y, Wang X J, Liu H 2023 *Opt. Eng.* **62** 010902
- [5] Hu X Y, Xu Y, Zhang H X, Xie J H, Niu D Q, Zhao Z, Qu X 2023 *IEEE Sensors J.* **23** 11374
- [6] Zhai H Z, Wu Q, Xiong K, Wang R 2019 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **31** 1335
- [7] Pashaie R, Vahedi M 2022 *Opt. Quant. Electron.* **54** 85
- [8] Xiang R, Chen C X, Kong B, Hong Q S, Lu L 2022 *Optics and Photonics J.* **12** 269
- [9] Liu T, Li Y W, Dai X Y, Gan W B, Wang X S, Dai S X 2023 *J. Lightw. Technol.* **41** 5169
- [10] Cheng H, Wang L, Wang J 2023 *Opt. Fiber Technol.* **79** 103363
- [11] Tian T, Zhou X, Wang S H, Luo Y, Li X G, He N H, Ma Y L, Liu W F, Shi R B, Ma G N 2022 *Energies* **15** 5849
- [12] Zhang F, Buchfellner F, Hu W B, Ao W X, Bian Q, Roths J, Yang M H 2025 *Photon. Sens.* **15** 250204
- [13] Daxini S, Aydin D, Giron A, Barnes J, Gu X J, Loock H P 2025 *Opt. Express* **33** 6039
- [14] Nadeem M D, Raghuvanshi S K, Kumar S 2022 *IEEE Sensors J.* **22** 7463
- [15] Ji L T, Li G, Zhang C, Su J, Wu C 2021 *IEEE Sensors J.* **21** 27482
- [16] Srivastava D, Das B 2020 *Sens. Actuators A Phys.* **315** 112215
- [17] Miao S J, Zhang W T, Song Y, Huang W Z 2020 *Opt. Express* **28** 12699
- [18] Man W Q, Zhang C Y, Peng J, He Q P 2025 *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **27** 107
- [19] Chow J H, Sheard B S, McClelland D E, Gray M B, Littler I C M 2005 *Opt. Lett.* **30** 708
- [20] Painchaud Y, Aubé M, Brochu G, Picard M J 2010 *Proc. Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, OSA Technical Digest Paper BTuC3*
- [21] Ding M, Chen D J, Fang Z J, Wang D, Zhang X, Wei F, Yang F, Ying K, Cai H W 2016 *Opt. Express* **24** 25370
- [22] Yu B, Jing M Y, Hu J Y, Zhang G F, Xiao L T, Jia S T 2016 *Laser Optoelectron. Prog.* **53** 080604 (in Chinese) [于波, 景明勇, 胡建勇, 张国峰, 肖连团, 贾锁堂 2016 *激光与光电子学进展* **53** 080604]

Strain measurement of ultra-narrow linewidth π -phase-shifted fiber Bragg grating based on frequency-stabilized laser*

YU Bo^{1)†} YIN Zhenqiang²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ DING Weijie¹⁾ LIU Weixin¹⁾ LI Jing¹⁾

1) (*Department of Physics, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China*)

2) (*CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

4) (*Hefei National Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China*)

5) (*Anhui Province Key Laboratory of Quantum Network, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 30 May 2025; revised manuscript received 11 July 2025)

Abstract

The fiber Bragg grating has the characteristics of anti-electromagnetic interference, electrically passive operation, multi-point sensing, corrosion resistance, and compact size. An ultra-narrow linewidth transmission peak can be formed by introducing a π phase shift at the center of uniform fiber Bragg grating. But this π phase-shifted fiber Bragg grating (PSFBG) with an ultra-narrow linewidth is very sensitive to the input optical intensity. The photothermal effect generated by the input light inside the grating will cause the frequency shift, which will degrade the measurement precision of grating. At the same time, the frequency drift of the laser itself will also increase the measurement error. In this paper, a high-precision strain measurement method is proposed by using the PSFBG with an ultra-narrow linewidth based on the frequency-stabilized laser. The incident laser is attenuated to a single-photon level to eliminate the photothermal effect in the PSFBG. The laser frequency is stabilized to the PSFBG with an ultra-narrow linewidth of 38 MHz by using the single-photon modulation technology. The influence of low-frequency flicker noise is eliminated through 9-kHz high-frequency modulation. The filter bandwidth of lock-in amplifier is 312.5 Hz with the integration time and filter slope of 300 μ s and 18 dB, respectively. The signal-to-noise ratio of error signal from the lock-in amplifier is 34. By tuning the resonant cavity length of the laser with the error signal, the output laser frequency is stabilized to the Bragg frequency of the PSFBG with an ultra-narrow linewidth of 38 MHz. The laser frequency fluctuation is limited to 4 MHz within 1000 s. The response sensitivity of Bragg wavelength to external strain in a range of 0 to 30 μ ϵ is 1.2 pm/ μ ϵ , with a standard error of 0.023 pm/ μ ϵ , and the linear fitting correlation coefficient is $R^2 = 0.997$. Due to the random drift of Bragg wavelength, caused by the environment temperature fluctuations, the corresponding strain measurement precision is 0.05 μ ϵ . The high-precision strain measurement by using the PSFBG with an ultra-narrow linewidth based on the frequency-stabilized laser is achieved, which will play an important role in the field of aerospace, civil engineering, energy engineering, etc.

Keywords: strain measurement, π -phase-shifted fiber Bragg grating, frequency locking, photothermal effect, single-photon modulation

PACS: 07.10.Pz, 07.85.Fv, 14.70.Bh

DOI: [10.7498/aps.74.20250701](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250701)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250701](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250701)

* Project supported by the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202403021211084) and the Science & Technology Program of Xinzhou City, China (Grant No. 20240509).

† Corresponding author. E-mail: yb@xztu.edu.cn

基于稳频激光的超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅应变测量

于波 银振强 丁伟杰 刘伟新 李静

Strain measurement of ultra-narrow linewidth π -phase-shifted fiber Bragg grating based on frequency-stabilized laser

YU Bo YIN Zhenqiang DING Weijie LIU Weixin LI Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 190701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250701

CSTR: 32037.14.aps.74.20250701

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

π 相移光纤光栅水听器的超声波传感指向特性

Ultrasonic sensing directivity of π -phase-shifted fiber Bragg grating hydrophone

物理学报. 2023, 72(6): 064303 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222154>

基于阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调技术综述

Review of fiber Bragg grating interrogation techniques based on array waveguide gratings

物理学报. 2022, 71(9): 094207 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212063>

基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控

Temperature field monitoring of lithium battery pack based on double-clad fiber Bragg grating sensor

物理学报. 2022, 71(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212302>

具有温度自补偿的保偏光纤布拉格光栅多参量传感器的设计与制备

Temperature-independent multi-parameter sensor based on polarization maintaining fiber Bragg grating

物理学报. 2023, 72(14): 144206 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230478>

基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

金属光栅覆盖分布式布拉格反射镜结构的透射增强效应

Transmission enhancement effect of distributed Bragg reflector structure covered with metal grating

物理学报. 2024, 73(11): 117301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240357>