

文章编号: 0258-7025(2004)08-0988-05

光纤光栅应力传感器信号检测中 双值问题的研究

陆 青, 詹亚歌, 向世清

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 介绍了采用匹配光纤布拉格光栅解调法(detector FBG)进行强度解调的基本原理,选择反射谱与传感光纤布拉格光栅(sensor FBG)反射谱部分重叠的解调光栅,通过探测解调光栅反射光强的变化进行解调。对这种光栅匹配解调法引起的反射光功率与应力为高斯函数而不是线性对应的问题——双值问题进行了研究,提出了一种新颖的多档光栅并联解调的解决方案,选择并联解调光栅的中心波长和带宽,从而实现所传感的应力与探测到的光功率之间的线性对应,并建立理论模型进行了模拟,从理论上进行了公式推导。最后以两档光栅并联解调为例,用实验证明了该方案切实可行,同时达到的传感范围为 $522 \mu\epsilon$,测量精度为 $2.6 \mu\epsilon$ 。

关键词 传感器技术;光纤布拉格光栅;匹配光纤布拉格光栅解调;双值

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Two-Values Question in Signal Detecting of Strain Sensor Based on Fiber Bragg Gratings

LU Qing, ZHAN Ya-ge, XIANG Shi-qing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The method of intensity demodulation with matched fiber Bragg gratings (FBG) is introduced. The FBG whose reflection spectrum overlaps with that of sensor FBG is selected to demodulate signals by detecting the changes of the intensity of reflected laser of demodulation FBG. The question that the intensity of reflected laser is a Gauss function of strain, i. e., two-values question caused by this method in strain sensors is studied. And a novel method that demodulation FBGs with well selected Bragg wavelength and bandwidth are in parallel connection is deduced so that the intensity of reflected laser is linear with strain. A theoretical model is set up and formulas are deduced. Finally this method is proved by experiment with two demodulation FBGs to be practicable and the sensor range is $522 \mu\epsilon$ and the sensitivity is $2.6 \mu\epsilon$.

Key words sensor technique; fiber Bragg grating (FBG); demodulation with matched FBG; two-values

1 引 言

基于光纤光栅的传感器有着传统光纤传感器无法具备的优势,如损耗低、复用能力强等。此外,其利用光纤光栅反射波长进行传感的机理,避免了干涉型光纤传感器中需考虑参考臂、停电时零点缺失等问题。因此,光纤光栅传感器引起了国内外学者的极大兴趣,已有很多关于检测光纤光栅的 Bragg

波长移动量的论文发表^[1~8]。

当把传感器嵌入(或粘于)被测结构中进行实时测量时,无论传感目标是应力、温度、振动或多个目标同时测量,都需要一种动态的波长移动检测方案。在各种检测光纤光栅波长移动的技术中,或是结构复杂、不易移动,或是解调仪器昂贵,不适合工程使用,都有一定局限性。本文从实用的角度出发,采用多档匹配光栅解调的方法,使用一般的线性光电探

收稿日期: 2003-04-14

作者简介: 陆 青(1979—),女,壮族,四川会理人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事光纤光栅传感领域的研究。E-mail: luqing61@yahoo.com.cn

测器,能实现对应力引起的光纤光栅中心波长移动的实时检测,符合工程使用的原则。

2 匹配光栅并联解调法的原理

以应力型光纤光栅传感器为例,光栅匹配解调法的示意图如图 1 所示。被预拉过的传感光纤布拉格光栅(sensor FBG)贴在待监测物体(如桥拱)上,当该物体受力发生形变时,会拉伸或压缩光纤光栅,致使该光栅的中心波长发生变化。同时选用一个与传感光栅中心波长相近的检测光纤布拉格光栅(即匹配光栅,detector FBG)作为检测光栅,使两个光栅的反射谱部分重叠。Sensor FBG 的反射输出信号为解调光栅 detector FBG 的输入信号。当 sensor FBG 受到来自待测物体的应力时,其输出的反射谱在一定波长范围内发生漂移,而 detector FBG 的反射谱是相对稳定的。Sensor FBG 的输出反射谱输入给 detector FBG 时,只有与两光栅的反射谱重叠部分相对应范围内的光波才能被反射,而重叠部分的面积与反射谱的光强度成正比。当两光栅反射谱重叠面积较大时,探测器探测到的光信号强度较大,反之则较小。

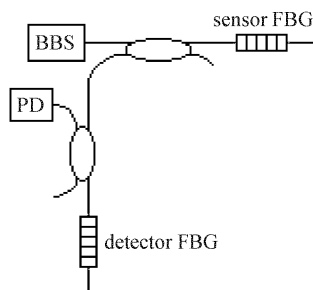


图 1 光栅匹配解调法示意图

Fig. 1 Principle of demodulation with matched fiber grating

若使 sensor FBG 受到的应力逐渐增加,一直到两个光栅的反射谱不再重叠,功率计 PD 上得到的完整的功率~应变曲线为两个光栅光谱函数的卷积——一个高斯函数,其参数与两个光栅光谱函数的参数等多个因素有关。当匹配光栅与传感光栅的中心波长完全一致时,PD 得到的数值最大;当待测物再受到应力而被拉伸或压缩时,匹配光栅与传感光栅的中心波长不完全一致,PD 的数值下降。由于 PD 只能得到一个绝对的数值,因此两个不同的应变变量可能对应同一个功率值。这就是双值问题。

为解决双值问题,设想采用多档匹配光纤光栅

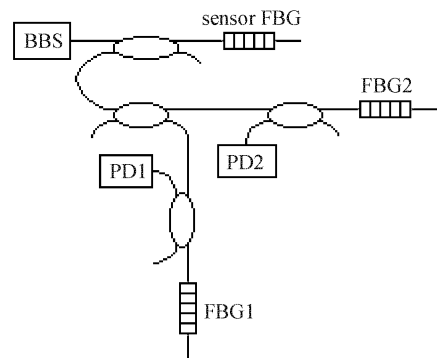


图 2 匹配光栅并联解调法示意图

Fig. 2 Schematic of demodulation with matched gratings in parallel connection

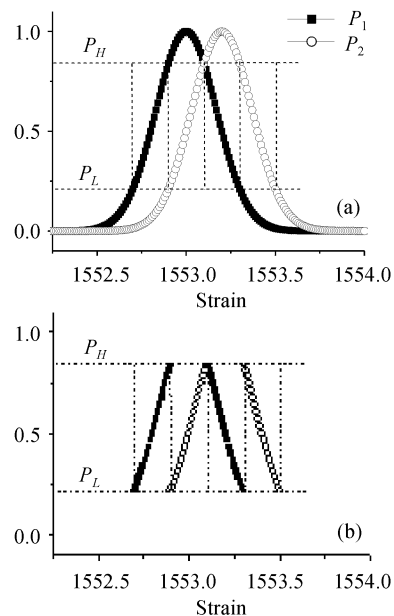


图 3 解决双值问题的理论模型

Fig. 3 Theoretical model to solve two-values question

并联解调的方法,以两档为例,如图 2 所示。为简单起见,假设光纤光栅反射谱的线型为高斯分布。通过巧妙地选取各档匹配光栅之间的中心波长间隔,能得到如图 3(a)所示的曲线,图中的两条曲线分别代表功率计 PD1,PD2 接收到的光功率曲线。由于高斯函数曲线在区间 $[P_L, P_H]$ 可视为直线,从图中可以看出,第一档的非线性部分与第二档的线性部分交叠,同理,第二档的非线性部分也与第一档的线性部分交叠。这样,选取两个合适的功率阈值 P_L, P_H ,当 PD1 得到的光功率大于 P_L 而小于 P_H ,PD2 得到的光功率小于 P_L 时,采用 PD1 的读数;当 PD1 得到的光功率大于 P_H ,PD2 得到的光功率大于 P_L 而小于 P_H 时,采用 PD2 的读数;当 PD1 得到的光

功率大于 P_L 而小于 P_H , PD2 得到的光功率大于 P_H 时,采用 PD1 的读数;当 PD1 得到的光功率小于 P_L , 而 PD2 得到的光功率小于 P_H 时,采用 PD2 的读数,如式(1)所示。这样,就可将曲线转化为如图 3(b)所示的四条直线相接而构成的一条折线,实现了光功率和应变的一一对应,去除了非线性部分数据的影响,同时也解决了双值问题

$$P = \begin{cases} P_1, & P_L < P_1 < P_H \quad \text{且} \quad P_2 < P_L \\ P_2, & P_H < P_1 \quad \text{且} \quad P_L < P_2 < P_H \\ P_1, & P_L < P_1 < P_H \quad \text{且} \quad P_H < P_2 \\ P_2, & P_1 < P_L \quad \text{且} \quad P_L < P_2 < P_H \end{cases} \quad (1)$$

下面进行具体计算。设传感光栅的反射谱 $S(\lambda)$ 为^[9]

$$S(\lambda) = I_0 \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_s)^2}{\Delta\lambda_s^2}\right] \quad (2)$$

其中, λ_s 为 sensor FBG 的中心波长, $\Delta\lambda_s$ 为半高带宽, I_0 为中心波长处的光强,它与光源的光强度、光栅的反射率有关。两个解调光栅 FBG1, FBG2 的反射谱 $R_1(\lambda), R_2(\lambda)$ 分别为

$$R_1(\lambda) = R_{B1} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{B1})^2}{\Delta\lambda_{B1}^2}\right] \quad (3)$$

$$R_2(\lambda) = R_{B2} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{B2})^2}{\Delta\lambda_{B2}^2}\right] \quad (4)$$

其中, R_{B1}, R_{B2} 分别为 FBG1, FBG2 中心波长处的反射率, $\lambda_{B1}, \lambda_{B2}$ 为 FBG1, FBG2 的中心波长, $\Delta\lambda_{B1}, \Delta\lambda_{B2}$ 为 FBG1, FBG2 的半高带宽。则 PD1, PD2 接收到的光功率 P_1, P_2 分别为

$$P_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_1 S(\lambda) R_1(\lambda) \quad (5)$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_2 S(\lambda) R_2(\lambda) \quad (6)$$

其中, α_1, α_2 为耦合器分束比、光路损耗等因素造成的总衰减,可近似为与波长无关。将(2), (3), (4)式代入(5), (6)式,经积分化简后得

$$P_1 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} \alpha_1 I_0 R_{B1} \cdot \frac{\Delta\lambda_s \cdot \Delta\lambda_{B1}}{(\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2)^{1/2}} \cdot \exp\left[-\frac{4\ln 2 (\lambda_s - \lambda_{B1})^2}{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2}\right] \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} \alpha_2 I_0 R_{B2} \cdot \frac{\Delta\lambda_s \cdot \Delta\lambda_{B2}}{(\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2)^{1/2}} \cdot \exp\left[-\frac{4\ln 2 (\lambda_s - \lambda_{B2})^2}{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2}\right] \quad (8)$$

式(7), (8)即为 PD1, PD2 处接收到的光功率,若将应力造成的传感光栅中心波长的漂移 $(\lambda_s + \Delta\lambda)$ 代入,就得到了 PD 处的光功率随传感光栅中心波长

变化而变化的函数($P \sim \Delta\lambda$), 如式(9), (10)所示。可见,其确实为一高斯函数

$$P_1 = P_{01} \cdot \exp\left[-\frac{4\ln 2 (\Delta\lambda + \lambda_s - \lambda_{B1})^2}{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2}\right] \quad (9)$$

$$P_2 = P_{02} \cdot \exp\left[-\frac{4\ln 2 (\Delta\lambda + \lambda_s - \lambda_{B2})^2}{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2}\right] \quad (10)$$

其中

$$P_{01} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} I_0 \alpha_1 R_{B1} \cdot \frac{\Delta\lambda_s \cdot \Delta\lambda_{B1}}{(\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2)^{1/2}} \quad (11)$$

$$P_{02} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} I_0 \alpha_2 R_{B2} \cdot \frac{\Delta\lambda_s \cdot \Delta\lambda_{B2}}{(\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2)^{1/2}} \quad (12)$$

同时可以看出, $P_1 \sim \Delta\lambda$ 曲线的峰值,亦即光功率的最大值由 $\Delta\lambda_s, \Delta\lambda_{B1}, R_{B1}$ 及 α_1 共同确定; $P_2 \sim \Delta\lambda$ 曲线的峰值由 $\Delta\lambda_s, \Delta\lambda_{B2}, R_{B2}$ 及 α_2 共同确定。在温度不变时,如果光纤光栅的拉伸是各向同性且均匀的,则光纤光栅的 Bragg 波长变化 $\Delta\lambda$ 和光纤的单位伸长量 ΔL 的关系为^[10]

$$\Delta\lambda = 0.78\lambda_B \cdot (\Delta L/L) = 0.78\lambda_s \cdot \epsilon \quad (13)$$

将(13)式代入(11), (12)式,得到所测应变与所得光功率的关系式

$$P_1 = P_{01} \cdot \exp\left[-\frac{4\ln 2 (0.78\lambda_s \epsilon + \lambda_s - \lambda_{B1})^2}{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2}\right] \quad (14)$$

$$P_2 = P_{02} \cdot \exp\left[-\frac{4\ln 2 (0.78\lambda_s \epsilon + \lambda_s - \lambda_{B2})^2}{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2}\right] \quad (15)$$

为得到易处理的数据,应尽量使 $P_{01} = P_{02}$, 可推出

$$\frac{\alpha_1 \cdot R_{B1} \cdot \Delta\lambda_{B1}}{(\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2)^{1/2}} = \frac{\alpha_2 \cdot R_{B2} \cdot \Delta\lambda_{B2}}{(\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2)^{1/2}}$$

对于图 2 中的结构, α_1, α_2 可视为近似相等,有

$$\frac{R_{B1}}{R_{B2}} = \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\Delta\lambda_{B1}} \sqrt{\frac{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2}{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2}} \quad (16)$$

此时,两个光栅中心波长的间隔为

$$\lambda_{B2} - \lambda_{B1} = \frac{1}{4} (\sqrt{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2} + \sqrt{\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B2}^2}) \quad (17)$$

取两条曲线交点处的光功率值为 P_H 值,易得

$$P_H = 2^{1/4} \cdot P_{01} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2\pi}{\ln 2}} I_0 \alpha_1 R_{B1} \cdot \frac{\Delta\lambda_s \cdot \Delta\lambda_{B1}}{(\Delta\lambda_s^2 + \Delta\lambda_{B1}^2)^{1/2}} \quad (18)$$

由式(16)~(18),可取一特殊情况:令两个解调光栅除中心波长相差 $\Delta\lambda_0$ 外,其他参数都相等,即 $\Delta\lambda_{B1} = \Delta\lambda_{B2}, R_{B1} = R_{B2}$, 则所得 P_1, P_2 曲线与图 3

中所示非常吻合,且易得 $\Delta\lambda = 0.5(\Delta\lambda_S^2 + \Delta\lambda_{B2}^2)^{1/2}$, 此时对数据处理要求的难度大大降低。在实际应用中,用同一掩模板制作两根带宽,反射率相等,而中心波长有一定间隔的光纤光栅是可以实现的。

由于本方法的核心是实现所得光功率与所测应变的一一对应,根据式(1), P_H 值的确定非常重要。如果单从(18)式来看,确定 P_H 值非常困难,光源的输出光强、光路的损耗、传感光栅的带宽及解调光栅的反射率和带宽都会对其产生影响。但是从一个系统的角度来看,问题并不复杂。在编写软件对数据进行处理时,将光源与光路损耗看作一个整体 P_{H0} , 它与 I_0 之间的关系是线性的,很容易得到。而光源抖动和光电探测器随机噪声引起的光功率抖动则可通过数据平均加以消除。此时, P_{H0} 可看作一个常数。因此, P_H 只与光栅参数有关,如式(19)所示

$$P_H = P_{H0} \cdot R_{B1} \cdot \frac{\Delta\lambda_S \cdot \Delta\lambda_{B1}}{(\Delta\lambda_S^2 + \Delta\lambda_{B1}^2)^{1/2}} \quad (19)$$

若实际使用时出现光栅损坏的情况,需换用不同的光栅,只需将新光栅的参数 $\Delta\lambda'_S$ 或 R'_{B1} , $\Delta\lambda'_{B1}$ 代入,即可得新的光功率阈值 P'_H 。

由以上分析可以看出,只要将第一次得到的光功率~应变曲线作为参考,并给出光源功率与 P_{H0} 的关系,就可以实现对应变的传感测量。即使发生光栅损坏的状况,也可用数据处理的方法很快恢复整个系统。

3 实验装置和结果

实验装置如图 4 所示。

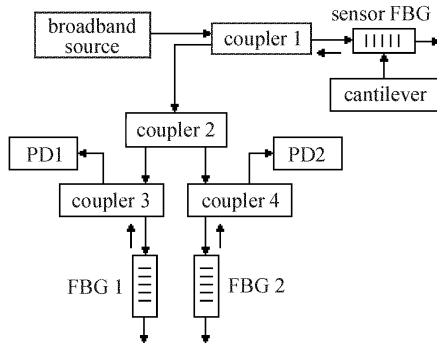


图 4 实验装置

Fig. 4 Schematic of experimental setup

其中光源采用香港 Opto-Link 公司的光通信 C 波段高功率宽带光源 OLS15C, 谱宽为 40 nm, 波长范围 1526~1566 nm; 耦合器 1, 3, 4 均为 2×2 耦合

器, 耦合比为 1:1, 耦合器 2 为 2×4 耦合器; sensor FBG 贴于悬臂梁上, 其中心波长为 1549.8 nm, 带宽为 0.27 nm, 中心波长处反射率为 83.5%; FBG1, FBG2 为匹配检测光栅, 中心波长分别为 1549.92 nm, 1550.11 nm, 带宽分别为 0.25 nm, 0.24 nm, 中心波长处反射率分别为 79%, 84%; 悬臂梁由同济大学提供, 加 1000 g 砝码对应 $130 \mu\epsilon$; 功率计 PD1, PD2 完成光电探测和电信号放大的功能。

在图 4 的实验装置上, 以 20 g 的增幅往悬臂梁上加砝码, 使得悬臂梁发生弯曲, 引起光栅中心波长变化, 同时记录 PD1, PD2 得到的电压值。根据悬臂梁的换算关系, 将砝码值转换为应变值, 可以得到如图 5 所示的结果。

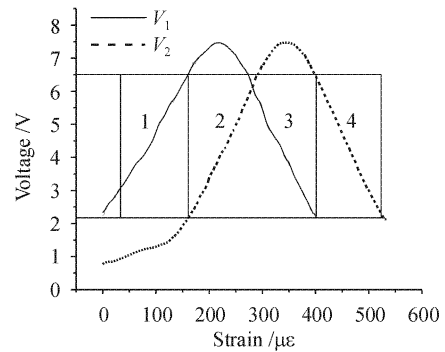


图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental results

从图 5 可以看出, 取 $V_L = 2.312 \text{ V}$, $V_H = 6.654 \text{ V}$, 将两条曲线划分为四个区域, 分别用 1, 2, 3, 4 四条直线来表示不同应力范围内的光功率值, 连成了如图 3(b)所示的折线。根据(17)式, 两个光栅的中心波长间隔应为 0.18 nm, 但限于条件, 实际间隔为 0.19 nm, 所以所取 V_H 值比两条曲线的交点处的电压值稍高。在换用不同的解调光栅后, 实际所得 V_H 值与计算所得非常吻合。同时, 整个应力传感器系统的传感范围为 $522 \mu\epsilon$, 测量精度达到 $2.6 \mu\epsilon$ 。

实验中还没有对温度漂移等问题进行补偿, 本方法只要各光栅处于相同的环境, 就象实际中测量桥拱的相同情形, 就可以进行温度补偿而不影响其有效性。

4 结 论

从理论分析了传感器中匹配光栅解调法的原理, 提出了一种新颖的方法来解决解调探测中会出

现的双值问题,并进行了实验研究。实验结果表明,多档匹配光纤光栅并联解调的方法是可行的,完全可以解决解调探测时的双值问题。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1370~1372
- 2 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):822~823
- 3 G. P. Brady, S. Hope, A. B. L. Ribeiro *et al.*. Demultiplexing of fibre Bragg grating temperature and strain sensors [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **111**:51~54
- 4 D. A. Jackson, A. B. L. Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14):1192~1194
- 5 T. Coroy, P. J. Ellerbrock, R. M. Measures *et al.*. Active wavelength demodulation of Bragg fibre-optic strain sensor using acousto-optic tunable filter [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(18):1602~1603
- 6 Guan Baiou, H. Y. Tam, S. L. Ho *et al.*. Study on strain/temperature two parameters sensing with a single fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):372~374
关柏鸥, H. Y. Tam, S. L. Ho 等. 单光纤光栅温度应变双参数传感研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):372~374
- 7 Huang Yonglin, Tong Zhengrong, Xiang Yang *et al.*. Temperature-insensitive displacement sensing using the chirp effect of fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1015~1018
黄勇林,童峥嵘,项阳等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的位移传感[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11):1015~1018
- 8 Xie Fang, Zhang Shulian, Li Yan *et al.*. A new wavelength shift detecting technology for fiber Bragg system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6):726~730
谢芳,张书练,李岩等. 光纤光栅传感器的波长检测系统及理论分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6):726~730
- 9 A. B. L. Ribeiro, L. A. Ferreira, J. L. Santos *et al.*. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4):934~939
- 10 Guo Wei, Liu Kai, Huang Yong-qing *et al.*. Study on fiber gratings Bragg wavelength shift caused by strain [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(1):23~25
郭威,刘凯,黄永清等. 应力作用下光纤光栅 Bragg 波长调谐特性的研究[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(1):23~25

《高技术要览——激光卷》出版发行

《高技术要览——激光卷》近期已由中国科学技术出版社最新出版上市。本书由中国科协大力倡导,在国家高技术“863”计划激光技术主题专家组组织、领导和支持下,有全国激光技术领域第一线工作的一百多位专家、教授和学者参加编写的一部有关激光科学技术内容的系统、全面的权威性参考性大型工具书。

本书共分13章,内容包括各种激光器(固体、气体、半导体、化学、自由电子、X射线激光等)的原理、技术特点、发展水平等,还包括非线性光学、激光的探测、激光的光束控制、自适应光学校正技术、激光在大气和海水中的传输、激光的热和力学效应及激光技术的应用等。该书几乎涵盖了激光科学技术的所有方面。不仅包括原理、技术特点,还包含了作者在科研实践中的新进展和新发现,同时阐述了国际上该领域的最新进展和今后的发展方向,内容系统全面,既有广度又有深度,具有一定的权威性;既可把它看作是我国激光技术领域主要研究工作的总结,也是对激光技术今后发展的启示。本书是理工科院校及与激光相关的研究、生产单位的图书馆之必备书。

本书220万字,大16开,精装护封,国际流行轻型材料,印刷品质上乘,定价298元。

需要订阅者,请与《激光与光电子学进展》编辑部联系

联系电话:021-69918426, 021-69918166

联系人:林锡祥,陈秀娥