

文章编号: 1006-4729(2005)03-0283-03

飞秒脉冲激光制备的 As_2S_3 光纤光栅的特性*

王淮生¹, 葛东东²

(1. 上海电力学院 数理系, 上海 200090;

2. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 利用在 800 nm 飞秒脉冲激光照射下光敏 As_2S_3 光纤具有的双光子吸收特性制备光纤光栅, 光纤光栅的周期由飞秒激光脉冲与 As_2S_3 光纤的夹角调制. 还分析了光栅结构及其 Bragg 反射特性.

关键词: 飞秒脉冲激光; 光纤光栅; Bragg 反射

中图分类号: TN244; O432.1⁺2 文献标识码: A

The Characteristics of As_2S_3 Fiber Grating Made by Femtosecond Pulsed Laser

WANG Huai-sheng¹, GE Dong-dong²

(1. Dept. of Mathematics and Physics, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The photosensitive As_2S_3 fiber has two-photon absorption property under the illumination of 800 nm femtosecond laser pulse. A fiber grating is made by the interference of two femtosecond laser pulses in As_2S_3 fiber, and the period of the grating is determined by the angle between the femtosecond laser pulses and the As_2S_3 fiber. The structure and Bragg reflection spectrum of the fiber grating are studied in this paper.

Key words: femtosecond pulsed laser; fiber grating; Bragg reflection

激光通过掺杂光纤时, 光纤的折射率将随光强的空间分布发生相应变化的特性, 称为光致折射率变化效应. 利用光纤的光致折射率变化效应可制成光纤光栅. 自从 1978 年加拿大渥太华通信研究中心的 Hill K O 等人首次在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏效应, 并采用驻波写入法制成世界上第一个光纤光栅以来, 光纤光栅的制造技术不断完善, 常用的有横向全息曝光写入法和相位掩膜写入法等. 所用的紫外光波从四倍频 Nd: YAG 激光器的 266 nm 到 ArF 准分子激光器的

193 nm.

由于飞秒脉冲具有极短的脉冲宽度和极大的瞬时功率, 飞秒脉冲激光及其放大技术已被广泛应用于微型加工、光波导以及光栅制备等方面, 如由于啁啾飞秒放大脉冲激光在透明电介质如 Al_2O_3 , TiO_2 的消融作用而形成表面光栅^[1]. 由于 As_2S_3 材料具有很强的光敏特性, 在光照下折射率最大变化可达 10^{-2} , 是一种理想的光器件和光集成材料. 在连续光及皮秒激光作用下, As_2S_3 材料可用来制作光波导和全息光栅^[2~5]. 本文将研

收稿日期: 2005-02-25

基金项目: 上海市教委自然科学基金一般项目(04Lb07); 上海市科委自然科学基金项目(04ZR14077); 上海电力学院发展基金(K-2004-03)

究 As_2S_3 光纤在飞秒脉冲激光作用下如何形成光栅, 以及该光纤光栅的 Bragg 反射特性.

1 飞秒激光与光纤光栅的形成

为方便起见, 我们讨论一维问题. 假定一束飞秒激光脉冲以一定的角度 α (与光纤方向的夹角) 照射在 As_2S_3 光纤上并以速度 v 传播, 而另一束飞秒激光脉冲在法线的另一面也以速度 v 沿与光纤方向成 α 角传播, 如图 1 所示.

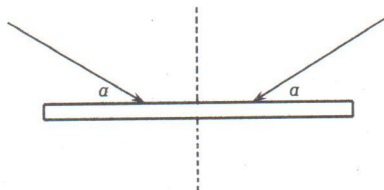


图 1 入射飞秒激光脉冲与 As_2S_3 光纤位置示意

设 t 时刻入射的两束飞秒激光脉冲的电场强度分别为

$$P_1 = E_1 \left(t - \frac{x}{v \cos \alpha} \right) \quad (1)$$

$$P_2 = E_2 \left(t + \frac{x}{v \cos \alpha} \right) \quad (2)$$

而 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 分别表示为

$$E_1(t) = E_{01} \exp \left(-\frac{t^2}{2T_0^2} \right) \cos(\omega_0 t) \quad (3)$$

$$E_2(t) = E_{02} \exp \left(-\frac{t^2}{2T_0^2} \right) \cos(\omega_0 t) \quad (4)$$

$E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 的复数分别表示为

$$\tilde{E}_1(t) = E_{01} \exp \left(-\frac{t^2}{2T_0^2} \right) \exp(i\omega_0 t) \quad (5)$$

$$\tilde{E}_2(t) = E_{02} \exp \left(-\frac{t^2}{2T_0^2} \right) \exp(i\omega_0 t) \quad (6)$$

式中, ω_0 为超短激光脉冲的中心圆频率, 其对应的中心波长为 $0.8 \mu\text{m}$.

锁模钛宝石激光器发出的超短激光脉冲经分束镜分成两束, 设激光脉冲强度的半极大值全宽 (FWHM) 为

$$\tau_p = 2 \sqrt{\ln(2)} T_0$$

两束脉冲光在 As_2S_3 光纤中发生干涉, 在 As_2S_3 光纤中叠加的光电场强度复数表示为

$$\tilde{p} = \tilde{E}_1 \left(t - \frac{x}{v \cos \alpha} \right) + \tilde{E}_2 \left(t + \frac{x}{v \cos \alpha} \right) \quad (7)$$

而光强为

$$I = \tilde{p} \tilde{p}^* \quad (8)$$

下面我们计算如下积分

$$G = \int_{-\infty}^{\infty} I^2 dt \quad (9)$$

经过运算可得

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 \quad (10)$$

这里

$$G_1 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} E_{01}^4 T_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} E_{02}^4 T_0 \quad (11)$$

$$G_2 = 2 \sqrt{2\pi} E_{01}^2 E_{02}^2 T_0 \exp \left(-\frac{2x^2}{v^2 T_0^2 \cos^2 \alpha} \right) \quad (12)$$

$$G_3 = 4 E_{01}^3 E_{02} T_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp \left(-\frac{3x^2}{2v^2 T_0^2 \cos^2 \alpha} \right) \cos \alpha_3 \quad (13)$$

$$\alpha_3 = \frac{2x}{v \cos \alpha} \omega_0 \quad (14)$$

$$G_4 = 4 E_{01} E_{02}^3 T_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp \left(-\frac{3x^2}{2v^2 T_0^2 \cos^2 \alpha} \right) \cos \alpha_4 \quad (15)$$

$$\alpha_4 = \frac{2x}{v \cos \alpha} \omega_0 \quad (16)$$

$$G_5 = 2 E_{01}^2 E_{02}^2 \sqrt{\frac{\pi}{2}} T_0 \exp \left(-\frac{2x^2}{T_0^2 v^2 \cos^2 \alpha} \right) \cos \alpha_5 \quad (17)$$

$$\alpha_5 = \frac{4\omega_0 x}{v \cos \alpha} \quad (18)$$

As_2S_3 光纤材料在 800 nm 飞秒激光照射下具有双光子吸收效应, 所以其折射率的变化与光强平方的曝光成正比. As_2S_3 材料折射率的变化最大值 (饱和值) 为 0.01 , 所形成的光栅对入射光波具有波长选择性, 即入射光波在光栅上将发生 Bragg 反射. G_1 和 G_2 只与 As_2S_3 材料折射率的直流分量变化有关, 而 As_2S_3 材料的折射率较大 ($n = 2.6$), 可以略去 G_1 和 G_2 的影响. 根据 Bragg 反射的特点, 可以不考虑 G_5 的影响. 因此, 折射率分布函数可近似表示为

$$n(x) = n + c_1 (G_3 + G_4) \quad (19)$$

式中, $n = 2.6$; c_1 为常数.

在实际应用中通常取 $E_{02} = E_{01}$, 通过控制曝光时间使折射率变化的幅度达到最大值 0.01 , 因而折射率分布函数也可近似表示为

$$n(x) = n + \Delta_0 \exp \left(-\frac{3x^2}{2v^2 \cos^2 \alpha T_0^2} \right) \cos \alpha_3 \quad (20)$$

式中, $\Delta_0 = 0.01$.

从方程 (20) 和 α_3 的表达式可以看出, 这是一种幅度变化的 Bragg 光纤光栅. 光纤光栅的长度 L_0 取 $1/e$ 折射率变化最大值宽度, 则

$$L_0 = \frac{2}{3} \sqrt{6} \nu \cos \alpha T_0$$

光栅的空间周期为 $\Lambda = 2\pi/K$, 而

$$K = \frac{2\omega_0}{\nu \cos \alpha} \quad (21)$$

Λ 可近似表述为

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2n} \cos \alpha \quad (22)$$

式中: ν —— 光在光纤中的速度;

λ_0 —— 超短脉冲激光在真空中的中心波长;

α —— 入射光与光纤表面的夹角;

n —— As_2S_3 材料有效折射率.

在上面的分析中, 光纤光栅的长度 L_0 远小于

其非线性长度, 因此我们可以忽略光纤固介质非线性而引起的光脉冲的畸变. 如果要求严格解, 则分析光纤的非线性 Schödinger 方程.

2 光栅的 Bragg 反射特性

由于方程(20)所表示的是一个非均匀光栅, 因而可以应用 Rouard 方法来分析其 Bragg 反射特性.

Rouard 方法是一种迭代法, 其基本思想是把光纤分成若干层, 每层的反射可用一个有效反射系数替代, 由各层反射光的相干叠加求出光栅的 Bragg 反射系数.

我们选 2 组参数计算光栅的反射率, 计算结果如图 2 和图 3 所示.

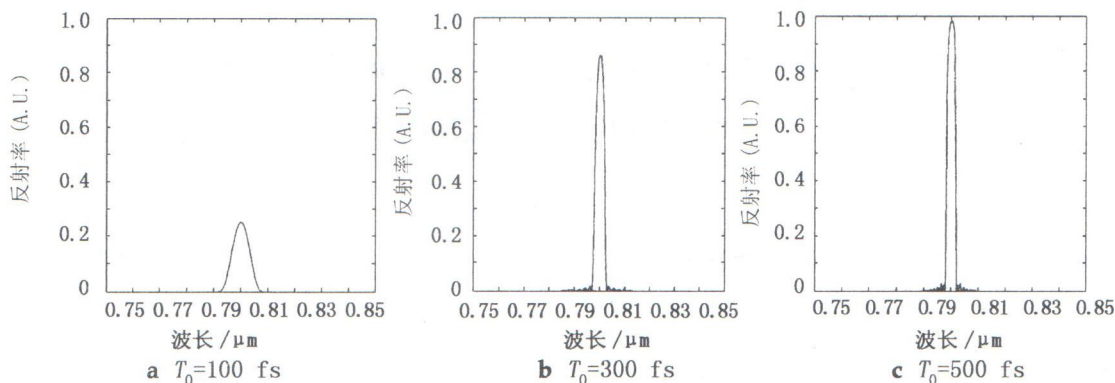


图 2 $\alpha = 0$ 时 As_2S_3 光纤光栅的 Bragg 反射率

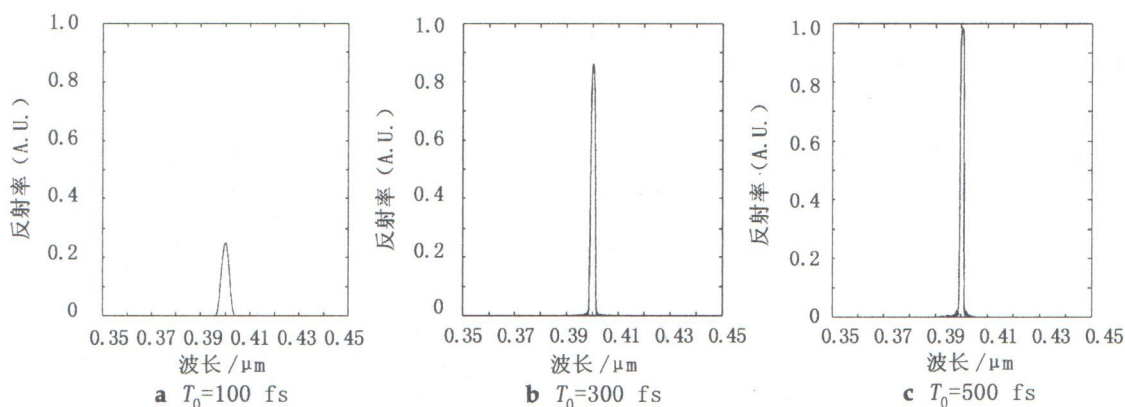


图 3 $\alpha = \pi/3$ 时 As_2S_3 光纤光栅的 Bragg 反射率

由图 2 和图 3 可知, As_2S_3 光纤光栅的 Bragg 反射谱的 Bragg 波长由入射飞秒激光脉冲与 As_2S_3 光纤的夹角 α 决定. 当 $\alpha = 0$ 时, Bragg 波长为 800 nm; 当 $\alpha = \pi/3$ 时, Bragg 波长为 400 nm. 从图 2 和图 3 中还可以看出, As_2S_3 光纤光栅的

Bragg 反射谱比较锐利, 即在 Bragg 波长两边的反射率迅速衰减为零; 数值计算表明, As_2S_3 光纤光栅的 Bragg 反射率的峰值随着入射飞秒激光脉冲宽度的增加而增大.

(下转第 290 页)

1988 23(12): 21~25.

[12] Hanzai H, Melikov A K, Fanger P O. Airflow Characteristics in the Occupied Zone of Ventilated Spaces[J]. ASHRAE Trans 1987 93: 524~539.

[13] Alandari F, Hammond G B, Melo C. Appropriate Calculation Methods for Convective Heat Transfer from Building Surfaces [C]. Proc. 1st U. K. National Conf on Heat Transfer 1984(2): 1 201~1 211.

[14] Chen Q. Indoor Airflow, Air Quality and Energy Consumption of Buildings [J]. Ph. D. Thesis of Delft University of Technology Delft. 1988: 1~20.

[15] Shuzo Murakami, Ryoza Ooka, Shinsuke Kato. Comparison of Numerical Predictions of Horizontal Nonisothermal Jet in a Room with Three Turbulence Models k-eps EVM, ASM and DSM[J], ASHRAE Transactions 1994 10Q: 697~704.

[16] Launder B E, Rodi W. The Turbulent Wall Jet measurements and Modeling[J]. Annual Review of Fluid Mechanics 1983 15: 429~459.

[17] Topp G, Nielsen P V, Davidson L. Room Airflows with Low Reynolds Number Effects[CD]. Proceedings of ROOMWENT 2000 Reading UK.

[18] 汤广发. 二维层流室内自然对流数值解[J]. 空气动力学学报, 1986 (4);

[19] 汤广发. 用三维紊流数值方法优化水电站主厂房通风气流组织设计[C]. 第三届全国暖通专业计算机方法交流会, 1987.

[20] 张建忠. 数值计算方法在通风空调领域的应用[C]. 中国力学学会第四届全国计算流体力学会议论文集, 1988 1~6.

[21] 富丁成. 分层空调的实践与探讨[C]. 全国暖通空调制冷学术年会论文集, 1994 242~246.

[22] 顾瑞英, 武文斐. 空调房间气流组织的数值模拟[C]. 全国高等学校工程热物理研究会第四届学术会议论文集, 1992 157~160.

[23] 童 灵. 受太阳辐射的空调房间的流场和温度场的数值研究[C]. 中国工程热物理学会传热传质学学术会议, 1996 89~94.

[24] 邓启红, 汤广发. 多重网格方法在通风空调气流数值模拟中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 1998 16(1): 48~54.

[25] 张 智. 空调制冷 制热时室内气流及温度分布数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2002 23(4): 457~460.

[26] 庄达民, 孟宪海. 室内气流分布的大涡模拟[J]. 空气动力学学报, 2002 20(3): 332~337.

[27] Rahmood Yaghoubi A. Three dimensional Numerical Simulation of Air Contamination Dispersion in a Room [J]. ASHRAE Technical Data Bulletin, 1995 59~68.

[28] Yu Fu. Room Air Distribution and Indoor Air Quality Modeling by Computational Fluid Dynamics [C]. The Second International Symposium on Heating Ventilation and Air Conditioning Beijing 1995 25~117.

[29] Teodosiu C. Experimental and Numerical Prediction of Indoor Air Quality [CD]. Proceedings of ROOMWENT 2000 Reading UK.

[30] 李先庭, 江 仪. 用计算流体力学方法求解通风房间的空气年龄[J]. 清华大学学报, 1998 38(5): 28~31.

[31] 赵 彬. 入口紊乱参数对室内空气分布的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2000 (1): 1~4.

[32] 徐 丽, 翁培奋, 孙为民. 三种通风方式下的室内气流组织与室内空气品质的数值分析[J]. 空气动力学学报, 2003 21(3): 311~319.

(上接第 285页)

3 结束语

在 800 nm 飞秒激光脉冲照射下, 由于 As_2S_3 光纤的光敏特性和双光子吸收效应, 当两束飞秒脉冲激光在 As_2S_3 光纤相干涉时, 干涉图案就永久地记录了一个光栅, 我们给出了该光纤光栅的解析表达描述, 并计算了其 Bragg 反射率, 结果表明这种光栅具有较锐利的反射谱, 且 Bragg 反射率随飞秒激光脉冲的宽度而变化. 由于 As_2S_3 材料既可以制成波导, 又能制成光栅, 是一种理想的集成光学材料. 锐利的反射谱表明, 利用飞秒激光制备的光纤光栅也是一种理想的、具有较高灵敏度的传感器元件.

参考文献:

[1] Kawamura K, Ogawa T, Sankura N, et al. Fabrication of Surface Relief Gratings on Transparent Dielectric Materials by Two-beam Holographic Method Using Infrared Femtosecond Laser Pulses[J]. Appl Phys B, 2000 (71): 119~121.

[2] Monro T M, Steike C M de, Poladian L. Selfwriting a Waveguide in Glass Using Photosensitivity[J]. Opt Commun, 1995 119: 523~526.

[3] Tanaka K, Toyosawa N, Hisakuni H. Photoinduced Bragg Gratings in As_2S_3 Optical Fibers[J]. Opt Letts, 1995 20 (19): 1976~1978.

[4] Ramachandran S, Bishop S G, Guo J B, et al. Fabrication of Holographic Gratings in As_2S_3 Glass by Photoexpansion and Photodarkening[J]. IEEE Photonics Technology Letters 1996 8(8): 1 041~1 043.

[5] Meneghini G, Villeneuve A. As_2S_3 Photosensitivity by Two-photon Absorption: Holographic Gratings and Selfwritten Channel Waveguides[J]. J opt Soc. Am. B 1998 15 (12): 2 946~2 950.