

文章编号: 0258-7025(2004)04-0449-03

铈共掺光纤光栅的谐振增强型 非线性光学效应

郭 勇, 宋继思, 黄永清, 陈 雪, 任晓敏

(北京邮电大学电信工程学院光通信中心, 北京 100876)

摘要 介绍了掺杂稀土元素的光纤非线性增强的机理, 给出了几种常用的掺杂稀土元素光纤和波导的非线性数据。掺杂稀土元素的光纤的非线性较之普通石英光纤的非线性有较大地增强, 然而掺杂稀土元素的光纤的非线性响应速度较慢, 并且和抽运光以及掺杂浓度相关。实验研究了铈共掺的光纤光栅的谐振增强型光学非线性, 采用 980 nm 抽运光入射到光栅, 用光谱仪观察光栅的透射谱。当抽运光入纤功率为 100 mW 时, 可实现 0.2 nm 的光栅布拉格波长移动。实验证明掺杂稀土元素离子的光纤光栅具有很高的非线性, 大约为普通光纤光栅的 10^6 倍, 这种光栅在全光开关等领域具有一定的应用价值。

关键词 光电子学; 铈共掺; 非线性; 光纤光栅

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Resonant Enhanced Nonlinearity in Yb:Er Codoped Fiber Bragg Grating

GUO Yong, SONG Ji-en, HUANG Yong-qing, CHEN Xue, REN Xiao-min

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract In this article, the mechanism of resonant enhanced nonlinearity is introduced in rare-earth doped fibers. The nonlinearity data of several rare-earth doped fibers are presented. The nonlinearity of rare-earth doped fibers is much greater than that of common silica fiber. However, the nonlinearity response speed in rare-earth doped fibers is lower than that in common silica fiber. At the same time, the nonlinearity enhancement is correlative with pump and dopant concentration. The resonant enhanced nonlinearity of Yb:Er codoped fiber Bragg grating has been investigated by experiment. The transmission spectrum of the FBF with various incident powers of 980 nm laser is recorded. The Bragg wavelength was shifted 0.2 nm with 100 mW incident power. This experiment demonstrates that the nonlinearity of rare-earth doped fiber Bragg grating has high nonlinearity coefficient as high 10^6 times as common silica fiber gratings. This type FBG has some application potentials in all-optical switch.

Key words optoelectronics; erbium ytterbium-codoped; nonlinearity; fiber Bragg grating

光纤光栅在光通信领域有很广的应用, 如色散补偿器、波分复用器、增益均衡等等。这些应用都是利用光纤光栅的线性性质。近年来人们对光栅的非线性研究逐步重视起来。光栅的非线性和线性光栅的一些性质结合起来会有很多新的应用。例如光栅色散和非线性结合可以形成光栅孤子。窄带反射和非线性结合可以形成双稳态和光开关。另外还有利

用光栅的非线性实现光脉冲的压缩等^[1]。但是制作光栅用的光纤的非线性很低, 许多应用都因为需要太高的光功率很难实现。所以提高制作光栅所用光纤的非线性是实现光栅诸多非线性应用的一个手段。对光纤进行掺杂是提高光纤非线性系数的有效方法, 对光纤的掺杂主要为稀土元素, 如铈、铈等; 半导体元素, 如镉; 另外还有磷、硫等。文献[2]介绍了

收稿日期: 2002-12-18; 收到修改稿日期: 2003-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60077027)资助项目。

作者简介: 郭 勇(1974—), 男, 黑龙江省人, 北京邮电大学光通信中心博士研究生, 主要研究方向为光通信器件。

E-mail: guoybupt@263.net

高掺铈、掺硫、掺磷光纤。掺杂稀土元素的光纤非线性依赖抽运光的存在,所以适合于全光开关的应用。我们实验研究了铒镱共掺的光纤光栅的非线性,证明了这种光纤光栅具有很高的非线性,在全光开关方面有一定的应用前景。

1 掺杂稀土元素光纤的光学非线性

非线性性质主要是折射率随入射光强的变化即

$$n = n(I) = n + \Delta n(I, x, y, z) \quad (1)$$

式中 I 为光强度, x, y, z 为光纤中的位置坐标。

克尔效应与折射率的变化和光强成正比,可以表示如下形式

$$\Delta n(I, x, y, z) = n_2 I(x, y, z) \quad (2)$$

n_2 定义为非线性折射率系数,用来表征光波导非线性的强度。其他的光致折射率变化都可以用(1)式来描述,但是折射率的变化和入射光强可能遵从不同的关系,不一定是线性的关系。本文研究的掺杂光纤光栅中的非线性和克尔效应不同,克尔效应研究的是信号光的折射率与自身光强的关系,而本文研究的非线性是信号波长的折射率通过其他的光强度来改变,即式(1)中的 I 不是信号光本身的光强度^[3]。这种非线性也叫作谐振增强的非线性,即通过对谐振波长抽运光的吸收来改变光波导的折射率。

掺杂稀土元素光纤的非线性来自掺杂离子在抽运光作用下的共振跃迁过程。这种非线性的机理是在抽运光的作用下,稀土元素离子中的电子发生跃迁,导致了电子分布的变化从而改变了光波导的折射率。非线性效应的性质、详细的理论分析可以参

阅文献[3],这里定性地阐述一下。在任何吸收介质中,折射率在吸收中心附近随波长变化非常快。这种折射率的变化可以用克喇末-克朗尼格关系来描述。并且任何吸收率的变化将导致折射率的变化。在图1中显示了由两个分立能级之间的跃迁而产生的吸收(洛伦兹线形)以及此吸收对折射率产生的影响。吸收引起的折射率变化在吸收中心附近的变化非常迅速,折射率变化的极大值出现在吸收谱线半极大全宽度处。由于折射率变化的曲线下落比吸收曲线要相对缓慢,这样,一个信号光的折射率就可能受到几个不同跃迁的影响,即使信号光的波长距离吸收中心很远。每个跃迁对信号光折射率的影响取决于吸收的强度和信号光波长距离吸收中心的大小。由于折射率变化曲线缓慢变化的拖尾,当光波长远离共振波长时非线性强度与波长基本无关了,体现了和克尔效应非常相似的性质^[4]。

表1给出了几种常用的掺杂稀土元素光纤的各项指标和参数^[5]。

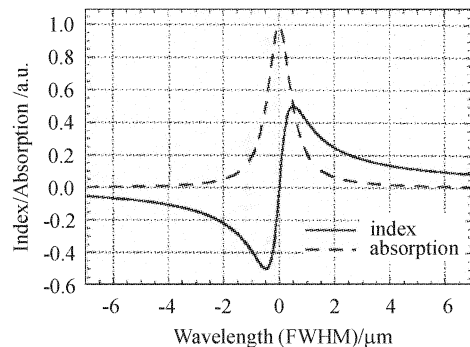


图1 克喇末-克朗尼格关系

Fig. 1 Kramers-Krönig relations

表1 掺杂稀土元素的光纤和波导的非线性

Table 1 Nonlinearity in rare-earth doped fiber and waveguide

Rare-earth element	Coefficient of nonlinear refractive index $n_2 / (\text{m}^2/\text{W})$	Response speed	Dopant concentration	Pump wavelength /nm
erbium	3.0×10^{-15}	10 ms	230×10^{-6}	514.5
ytterbium	0.62×10^{-15}	750 μs	0.2 wt.-%	1310
neodymium	4.7×10^{-15}	390 μs	0.24 wt.-%	823
samarium	3×10^{-19}	<5 ns	1000×10^{-6}	1064

实验采用 980 nm 的激光作抽运光,对应着铒离子 $^4I_{15/2} - ^4I_{11/2}$ 能级之间的跃迁^[6],镱离子 $^2F_{7/2} - ^2F_{5/2}$ 能级之间的跃迁^[4]。铒镱共掺的光纤可以共用一个抽运光,即用铒镱共掺的光栅在 980 nm 处的吸收来影响 1550 nm 波段信号光的折射率。

2 实验方案与结果

采用掺铒光纤放大器的自发辐射作为宽光源,用波分复用耦合器把 980 nm 的抽运光和 1550 波段的宽光源耦合到光纤光栅中,用光谱仪来记录光栅透射谱随抽运光强度变化而发生的改变。

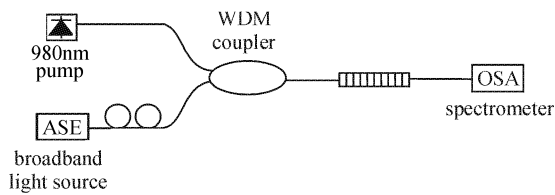


图 2 实验原理图

Fig. 2 Experiment scheme diagram

实验所用光栅的长度为 2 cm, 由于光栅两端有 10 cm 长的尾纤, 抽运光在光栅的前端就已经被吸收了一部分, 这样就增加了对抽运光功率的要求。

在不同抽运光的功率下测量了光栅的透射谱, 从中选出了一些有代表性的结果, 其中最大的布拉格波长移动达到了 0.2 nm。通过测量光纤光栅布拉格波长的移动, 可以计算出铈共掺的光纤光栅的非线性, 光纤光栅的布拉格波长由下式决定

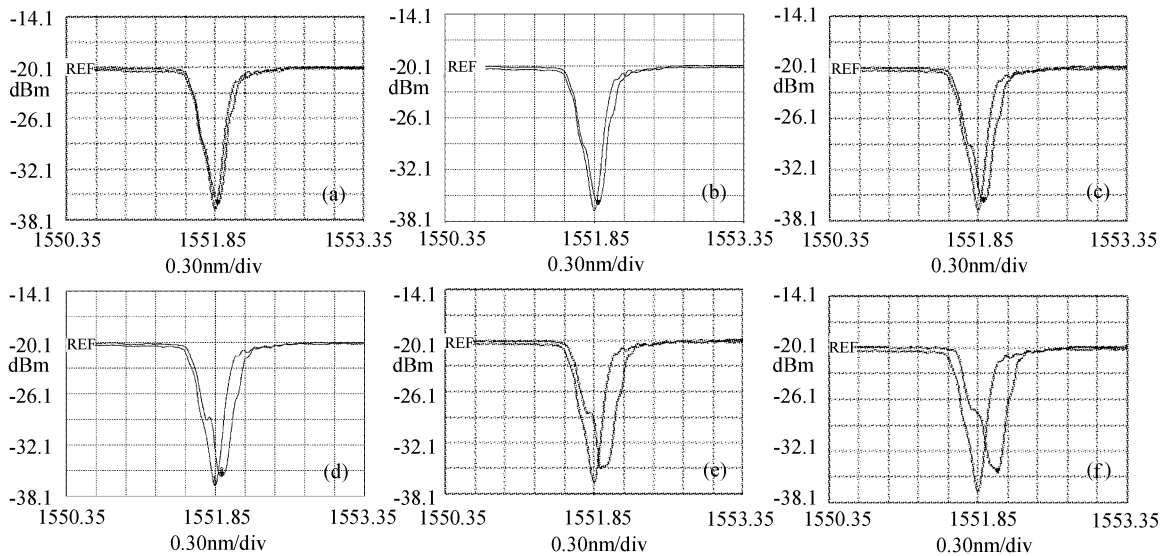


图 3 光纤光栅在不同入射抽运光功率下的透射谱

Fig. 3 Spectrum of fiber Bragg grating under different incident pump powers

(a) 35 mW; (b) 40 mW; (c) 46 mW; (d) 55 mW; (e) 70 mW; (f) 104 mW

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

n 为有效折射率, Λ 为光栅的周期。从上式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n\Lambda$$

光栅的周期 Λ 取 $0.5167 \mu\text{m}$ (有效折射率取典型值 1.46), 在 0.2 nm 的布拉格波长移动情况下, $\Delta n = 3.870 \times 10^{-4}$, 再由(2)式就可推算出非线性折射率系数 n_2 , 光纤的有效面积取 $50 \mu\text{m}^2$

$$n_2 = \Delta n / I = 3.870 \times 10^{-4} / (0.1 / 50 \times 10^{-12}) = 1.9350 \times 10^{-14} (\text{m}^2/\text{W})$$

而普通石英光纤的非线性折射率系数典型值为 $2.3 \sim 3.4 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}^{[7]}$, 铈共掺的光纤光栅的非线性比普通石英光纤光栅的非线性要强 10^6 倍左右。

3 结 论

实验证明铈共掺光纤光栅具有很大的非线性效应, 可用来实现光开关等应用。由于掺铈的缘故光栅对不同波长光信号的增益不同, 造成了透射谱

的变形。单独掺铈的光栅的非线性响应速度更快, 以后的工作考虑用单独掺杂铈的光栅做一些应用。

参 考 文 献

- 1 C. M. de Sterke, N. G. Broderick, B. J. Eggleton *et al.*. Nonlinear optics in fiber gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, **2**:253~268
- 2 Gong Yandong, Guan Yali, Jian Shuisheng. Research on special fibers with high nonlinearity [J]. *Optical Fiber and Electric Cable*, 2000, **2**:34~36
龚岩栋, 关雅莉, 简水生. 非线性特种光纤[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2000, **2**:34~36
- 3 R. A. Betts, T. Tjuriarto, Y. L. Xue *et al.*. Nonlinear refractive index in erbium doped optical fiber; theory and experiment [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(4):908~913
- 4 J. W. Arkwright, P. Elango, G. R. Atkins *et al.*. Experimental and theoretical analysis of the resonant nonlinearity in ytterbium-doped fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(5):798~806
- 5 P. L. Chu. Nonlinear effects in rare-earth-doped fibers and waveguides [C]. *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 1997, LEOS '97 10th Annual Meeting. Conference Proceedings, IEEE, 1996, **1**:371~372
- 6 Nie Qihua. Technologies of Fiber Laser and Amplifier [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997
聂秋华. 光纤激光器和放大器技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997
- 7 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. 3rd edition, New York: Academic Press, 2001. 20