

# 低功耗非线性光纤光栅全光开关<sup>\*</sup>

张 兵 徐文成 李淳飞<sup>†</sup>

(华南师范大学信息光电子科学技术学院 广州 510631)

**摘 要** 全光开关是未来全光通信和光计算机的关键器件. 已经研究过的全光开关的种类很多, 其中光纤光栅全光开关最容易与光纤系统匹配. 文章首先陈述两种基于普通石英光纤的单光栅全光开关, 即光纤布拉格光栅 (FBG) 全光开关和长周期光纤光栅 (LPFG) 全光开关, 这两种低非线性的光开关要求千瓦量级的高开关功率, 故不宜应用; 然后重点介绍两种高非线性的光纤光栅全光开关, 它们分别由单个高非线性 FBG 和用高非线性光纤连接的 LPFG 对构成. 文章所介绍的非线性光纤材料是以掺稀土石英光纤为例. 这两种高非线性的光纤光栅全光开关具有毫瓦量级的低开关功率, 有可能获得实际应用.

**关键词** 全光开关, 光纤光栅, 非线性光学

## All-optical switches based on nonlinear fiber gratings

ZHANG Bing XU Wen-Cheng LI Chun-Fei<sup>†</sup>

(School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract** The all-optical switch (AOS) is a key device for future all-optical communication and all-optical computing. There are many types of AOSs that have been investigated; one of them is the fiber-grating AOS, which is easily matched with fiber systems. We first describe two kinds of ordinary silica single fiber-grating AOSs based on the fiber Bragg grating (FBG) and the long-period fiber grating (LPFG), respectively. Both of these require kilowatt switching powers, so they cannot be used in practice. Secondly, we introduce two kinds of highly nonlinear fiber-grating AOSs, one based on a single nonlinear FBG and the other a pair of linear LPFGs connected by a nonlinear fiber. The nonlinear fibers that we use are rare-earth doped silica fibers. Both of the nonlinear fiber-grating AOSs have low milliwatt-level switching powers, and thus may be used in applications.

**Keywords** fiber grating, all-optical switching, nonlinear optics

## 1 引言

为了加快信息处理的速度和带宽, 信息技术领域正在酝酿着一场以光子数字信息处理技术取代电子数字信息处理技术的革命. 在这场革命中起着关键作用的器件是以光控光的全光开关器件. 自从 20 世纪 60 年代激光发明之后, 人们就开始研究全光开关, 历时半个世纪, 耗费大量经费, 但是全光开关器件至今没有实用化. 其原因是: 基于非线性光学原理

的全光开关, 不能做到驱动开关的光功率低到相当光信号的功率, 即毫瓦量级开关功率, 更不能同时做到开关速度超过电子开关的速度, 即皮秒量级开关速度.

已经研究过的全光开关的种类繁多, 但是在宏观条件下, 毫瓦功率、皮秒速度、透明度高、体积小、结构

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10474017)、广东省自然科学基金(批准号: 04010397)资助项目

2010-09-02 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人: 李淳飞, 哈尔滨工业大学教授, 华南师范大学客座教授. Email: cfli@yahoo. cn

简单的全光开关几乎做不出来. 研究经验表明, 只有在纳米器件尺寸和飞秒脉冲光源的条件下, 即时间、空间高度集中的情况下, 才有可能产生实用的全光开关. 具有微纳尺寸光栅常数的非线性光纤光栅全光开关, 其实就是一种一维准光子晶体, 它们不仅可能同时实现毫瓦开关功率和皮秒开关速度, 而且还具有插入损耗低、可调谐、体积小、易于与光纤通信系统连接等优点. 本文将重点介绍两种低功耗、有实用价值的非线性光纤光栅全光开关的基本原理.

## 2 常规的光纤布拉格光栅(FBG)全光开关

光纤布拉格光栅(FBG)是一种全反射型的短周期光纤光栅, 光栅常数  $\Lambda_B < 1\mu\text{m}$ . 根据能量守恒原理, 入射光子能量等于反射光子能量,  $h\omega_i = h\omega_r$ , 因此入射光的波长  $\lambda_i$  等于反射光的波长  $\lambda_r$ . 两束光的波矢的关系为

$$k_i = -k_r \quad (1)$$

若信号光的中心波长  $\lambda$  等于光栅谐振波长  $\lambda_B$  (简称光栅波长), 即满足布拉格条件时, 有  $\lambda_i = \lambda_r = \lambda_B$ . 入射波与反射波的耦合, 形成在谐振波长附近带宽很窄的反射带, 如图 1 所示.

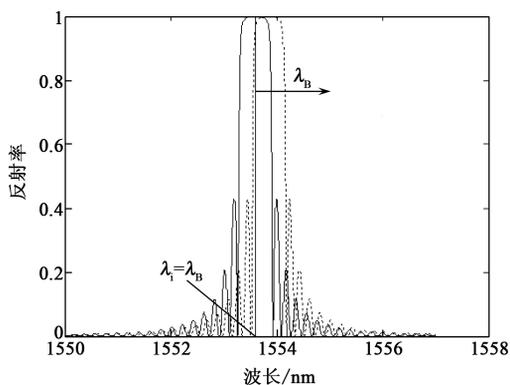


图 1 抽运光的增强使 FBG 反射谱向右移动半个宽度, 实现全光开关

若该光栅的参数是:  $\Lambda_B = 535\text{nm}$ ,  $L = 4\text{mm}$ ,  $\lambda_B = 1553.6\text{nm}$ , 则谱宽小于  $1\text{nm}$ . 根据动量守恒原理, 3 个波矢满足以下关系:

$$k_i - k_r = k \quad (2)$$

其中各波矢的数值为

$$k_i - k_r = \frac{2\pi n}{\lambda_B} \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\Lambda_B} \quad (4)$$

由(3)式和(4)式得到 FBG 的光栅波长表达式为

$$\lambda_B = 2n\Lambda_B \quad (5)$$

式中  $n$  为光纤的有效折射率,  $\Lambda_B$  为光栅常数.

在一束连续的强光作用下, 产生光克尔效应, 光纤的折射率  $n$  随通过光栅的光强  $I$  的变化而变化, 有

$$n = n_0 + n_2 I \quad (6)$$

式中  $n_0$  是光纤的线性折射率,  $n_2$  是光纤的非线性折射系数. 将(6)式代入(5)式, 得到光强引起的光栅波长的位移量为

$$\Delta\lambda_B = 2n_2\Lambda_B I \quad (7)$$

也就是光强的增大将使光栅波长红移. 事实上, 当入射光是连续的或长脉冲的情况下, 光强的增大会引起光栅热膨胀, 使光栅周期  $\Lambda_B$  变大, 也会引起光栅波长红移. 在两种效应共同作用下, 使信号光的反射谱发生如图 1 所示的方向移动. 如果光栅波长正好移动半个谱宽, 信号光的透射率将从最低变为最高, 从而实现了对信号光的一次完全的开关转换.

1990 年, Larochelle<sup>[1]</sup> 等人首次报道了在交叉相位调制方式下石英 FBG 的全光开关实验. 实验中的 FBG 具有谐振波长  $\lambda_B = 514.5\text{nm}$ , 光栅长度  $L = 3.5\text{cm}$ . 信号光为波长  $514.5\text{nm}$  的连续  $\text{Ar}^+$  激光; 抽运光为脉宽  $100\text{ps}$ 、波长  $1064\text{nm}$ 、重复频率为  $1\text{kHz}$  的脉冲 YAG 激光. 在抽运光的作用下, 实现了阈值开关功率为  $4.5\text{kW}$ 、信号光开关幅度为  $55\%$  的全光开关.

1998 年, Taverner<sup>[2]</sup> 等报道了在自相位调制方式下石英 FBG 的全光开关的实验. 实验中 FBG 具有的谐振波长为  $1535\text{nm}$ , 光栅长度为  $8\text{cm}$ . 所用的光源是由一个波长与功率可调的 DFB 半导体激光器加掺铒光纤放大器构成, 具有重复频率  $4\text{kHz}$ , 脉冲半峰值宽度  $3\text{ns}$ , 可获得大于  $20\text{kW}$  的峰值功率. 在峰值功率达到  $4\text{kW}$  时, 实现了开关幅度为  $40\%$  的全光开关.

以上两种石英 FBG 全光开关都不能应用, 因为石英的非线性太弱 ( $n_2 = 2.6 \times 10^{16} \text{cm}^2/\text{W}$ ), 需要开关光功率超过  $4\text{kW}$ .

## 3 常规光纤长周期光栅(LPFG)全光开关

光纤长周期光栅(LPFG)的光栅周期  $\Lambda_L$  远大于 FBG 的光栅周期  $\Lambda_B$ , 一般要大几百倍. 在 LPFG

中,正向传播的纤芯基模和同向传播的包层模间发生耦合,在满足相位匹配的条件下两模发生干涉,使透射谱增宽.图2给出了光栅长度为10mm的LPFG的透射谱,其谱宽约为20nm.通常LPFG的透射谱可以达到FBG谱宽的几百倍.

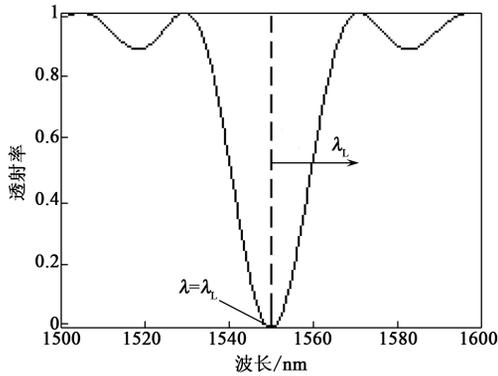


图2 随光强增大,LPFG的透射谱发生红移,实现全光开关

设LPFG中同向传播的纤芯基模、包层模和光纤光栅三者的波矢分别为 $k_{co}$ 、 $k_{cl}$ 和 $k$ ,它们之间满足动量守恒关系,即

$$k_{co} - k_{cl} = k \quad (8)$$

式中

$$k_{co} - k_{cl} = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{co} - n_{cl}) = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n_g \quad (9)$$

$$k = \frac{2\pi}{\Delta L} \quad (10)$$

其中 $\Delta L$ 为LPFG的光栅常数, $\Delta n_g = n_{co} - n_{cl}$ 为基模与包层模的有效折射率差.因此由(9)式和(10)式得到

$$\lambda = \Delta L \Delta n_g \quad (11)$$

随着光强的增加,根据光克尔效应,纤芯的折射率发生变化(忽略包层折射率的变化)为 $\Delta(\Delta n_g) \approx \Delta n_{co} = n_2 I$ ,因此由(11)式可得到光栅波长的变化为

$$\Delta \lambda_L = \Delta L n_2 I \quad (12)$$

当入射信号波长等于光栅波长即 $\lambda = \lambda_L$ 时,信号光的透射率最低;随光强的增大,透射谱向长波方向移动,透射率上升,直至透射谱移动半个谱宽,信号光透射率达到最大,从而完成光开关过程.

1997年,Eggleton<sup>[9]</sup>等用自相位调制法观测石英LPFG的光开关特性.光栅的参数为: $\Delta L = 320\mu\text{m}$ , $L = 55\text{mm}$ , $\Delta n_g = 0.003$ .采用波长1052.8nm、脉宽100ps、重复率500HZ的锁模YLF激光做光源,当光脉冲峰值功率达到4.5kW时,实现了幅度80%的光开关.

为什么以上LPFG光开关和FBG光开关的开关功率具有相同数量级?因为LPFG的光栅常数比FBG的光栅常数大百倍,对于相同的光功率引起光栅波长的移动大百倍;同时,LPFG的透射谱的半宽度比FBG的透射谱半宽度大百倍,要使光栅波长移动半个谱宽,需要较大的功率,两种因素相互抵消,使两种光开关的开关功率具有相同的数量级.可见以上两种单个的光栅全光开关都因为石英光纤的非线性太低而不能实用.

#### 4 非线性FBG全光开关

由式(7)可见,若增加光纤光栅的非线性折射系数 $n_2$ ,可以增大 $\Delta \lambda_B$ ,从而降低阈值开关功率.1997年,Janos等<sup>[3]</sup>用长为30mm的掺Yb<sup>3+</sup>石英光纤做FBG,以波长为1550nm的连续半导体激光作信号光,以波长为980nm的矩形脉冲光作抽运光.由于掺Yb<sup>3+</sup>石英光纤的非线性折射系数较高( $n_2 = 6.2 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{W}$ ),当抽运光功率为20mW、重复频率为1Hz时,得到63%的开关幅度.据分析,这种光开关基于热和电子两种效应,其中热效应的贡献为53%,时间常数约150ms,电子效应的贡献约10%,材料的响应时间为1ms.

2003年,Guan等<sup>[4]</sup>采用高掺杂的掺Er<sup>3+</sup>光纤做FBG材料,该材料的非线性折射系数为 $n_2 = 3 \times 10^{-11} \text{cm}^2/\text{W}$ .以波长为1480nm的信号光作自相位调制,在20mW和50Hz的抽运功率下,获得幅度为56%的光开关.当抽运功率增大到300mW时,使用调制频率50Hz,500Hz,5kHz,相应的开关幅度分别达到90%、70%、37%.

可见以上两种掺稀土的石英光纤光栅全光开关的开关功率皆低到20mW,可以被应用.但是开关速度较慢,都是ms量级.

表1列出了不同光纤材料的非线性折射系数 $n_2$ 和响应时间.从表1可以看出, $n_2$ 较大的材料具有较低的阈值开关功率,但材料的非线性响应时间较长,也即开关速度较慢.同时 $n_2$ 较大的材料其光的吸收也较大,相比之下,硫化物玻璃光纤要比掺稀土石英光纤的响应时间快,而且光学损耗要小些,只是这种材料在加工工艺上有一定难度(有毒).

这里要说明的是,非线性折射系数与光纤的掺杂浓度有关.因掺杂浓度不同,测得的非线性折射系数有所不同,有时差1个数量级.

表1 不同光纤材料的非线性折射系数与响应时间

光纤材料	$n_2 / (\text{cm}^2/\text{W})$	抽运波长 /nm	响应时间	参考文献
石英(Silica, SiO <sub>2</sub> )光纤	$2.6 \times 10^{-16}$	1550	<1ps	[5]
掺钐(Sm)石英光纤	$3.0 \times 10^{-15}$	1064	<5ns	[8]
硫化物玻璃(As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> )光纤	$6.8 \times 10^{-14}$	700	2ns	[6]
掺镱(Yb)石英光纤	$6.2 \times 10^{-12}$	1310	750μs	[7]
掺铒(Er)石英光纤	$3.0 \times 10^{-11}$	514.5	10ms	[8]
掺钕(Nd)石英光纤	$4.7 \times 10^{-11}$	823	390μs	[8]

### 5 普通石英光纤连接的 LPFG 对全光开关

由图3可见,这种用一根光纤连接的两个 LPFG, 可以看作是一个双光束干涉型的 M-Z 干涉仪. 其中一对光栅的作用相当两个光耦合器,第一个光栅把光纤中的纤芯模分解为纤芯模与包层模两部分. 剩余的纤芯模与同向传播的圆筒状的包层模在光纤中同时传输,到达第二个光栅后发生干涉,然后输出一个具有干涉条纹结构的单 LPFG 的透射谱.

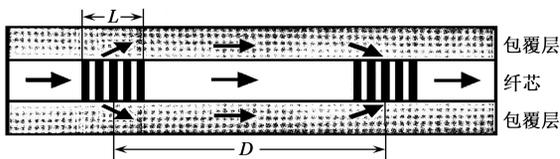


图3 LPFG 对中的纤芯模和包层模的传输和干涉类似于 M-Z 干涉仪的作用

信号光在 LPFG 对传播时,设同向传输的纤芯模与包层模的波矢的幅值分别是  $k_1 = (2\pi/\lambda)n_{co}$  和  $k_2 = (2\pi/\lambda)n_{cl}$ , 其中  $n_{co}$  和  $n_{cl}$  分别为光纤对纤芯模与包层模的折射率;在输出端的场振幅分别为  $E_1(z)$  和  $E_2(z)$ ;LPFG 的长度和间隔分别为  $L$  和  $D$ . 若初始条件为  $E_1(0) = 1$  和  $E_2(0) = 0$ , 且已知入射光振幅,则光通过 LPFG 对的传输方程可以写成与 M-Z 干涉仪类似的耦合方程组,解出输出光振幅,从而得到作为透射功率对入射功率比值的 LPFG 对的透射率公式<sup>[9]</sup>:

$$T_{\text{pair}} = \frac{|E(D)|^2}{|E(0)|^2} = |T \exp(i\Delta\phi) - \gamma R|^2 = T^2 + \gamma^2 R^2 - 2\gamma TR \cos\Delta\phi \quad (13)$$

式中  $\Delta\phi$  为纤芯模和包层模经过 LPFG 对后的相位差;  $T = |t|^2$  和  $R = |r|^2$  分别为单 LPFG 的透射率和反射率,  $t$  和  $r$  分别为 LPFG 的透射系数和反射系数,它们是光栅的失谐系数  $\delta$  和模耦合系数  $\kappa$  的函数<sup>[9]</sup>,二者分别定义为

$$\delta = \pi \Delta n_g \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_L} \right), \quad \kappa = \frac{\pi \overline{\delta n_{\text{eff}}}}{\lambda} \quad (14)$$

式中  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  为光栅的平均折射率调制幅度,  $\Delta n_g = n_{co} - n_{cl}$ ;  $\gamma$  为光在非线性光纤中的损耗系数,  $\gamma = \exp[-(\alpha_1 + \alpha_2)L]$ , 其中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为纤芯模和包层模的吸收系数,一般包层模的吸收远大于芯模的吸收,即  $\alpha_2 \gg \alpha_1$ .

若不存在抽运光,两光的相位差为  $\Delta\phi = \Delta\phi_0$ , 设两光栅中点间的距离为  $D+L$ , 则

$$\Delta\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_g (D+L) \quad (15)$$

可用(13)–(15)式算得 LPFG 对的透射谱,如图4所示<sup>[10]</sup>. 计算中采用数据  $\lambda_L = 1550\text{nm}$ ,  $\Delta_L = 300\mu\text{m}$ ,  $\Delta n_g = 5 \times 10^{-3}$ ,  $\gamma = 0.8$ ,  $L = 50\text{mm}$ ,  $D = 35\text{cm}$ , 以及取不同的平均折射率调制幅度  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  值:  $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 0.75 \times 10^{-5}$ ,  $0.96 \times 10^{-5}$ ,  $1.11 \times 10^{-5}$  和  $1.25 \times 10^{-5}$ , 得到4个不同的透射谱. 图中显示 LPFG 的透射谱是由干涉条纹形成的若干次峰组成,每个次峰的宽度很窄,利用它做光开关,开关功率将大大降低.

由图4可见,随着  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  的增大,在 1550nm 附近的干涉峰的消光比逐渐减小,最后形成双峰结构,在中心波长处出现凹陷,如图4(d)所示.

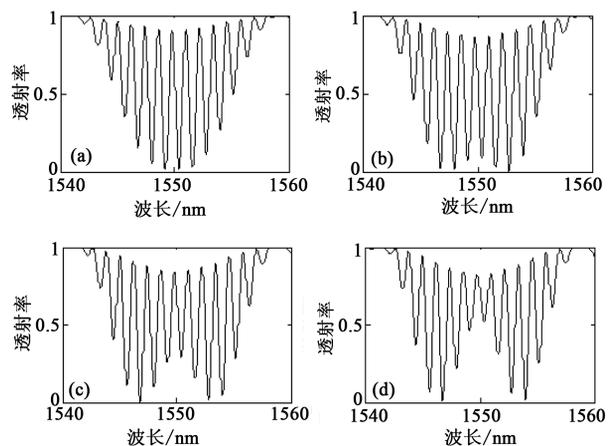


图4 光栅的平均折射率调制幅度对透射光谱的影响 ( $\overline{\delta n_{\text{eff}}} =$  (a)  $0.75 \times 10^{-5}$ ; (b)  $0.96 \times 10^{-5}$ ; (c)  $1.11 \times 10^{-5}$ ; (d)  $1.25 \times 10^{-5}$ )

2000年, Yoochan 等<sup>[11]</sup>用交叉相位调制方法研究了用普通石英光纤连接的 LPFG 对全光开关. 其实验装置如图5所示. 两 LPFG 长 3cm, 间距 60cm, 光栅波长 1565nm, 透射谱宽 17nm, 单峰宽 0.5nm. 信号源是波长为 1565nm 的可调谐半导体激光器; 抽运源是波长 1064nm 的、调 Q 的 YAG 激光器. 用一个 3dB 耦合器将信号光与抽运光一起输入光栅对. 用偏振控制器使两光偏振方向平行, 以获得高效率的非线性相互作用.

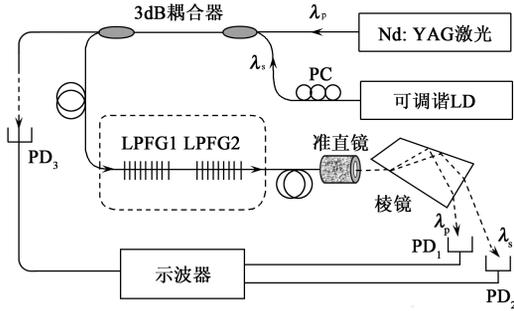


图5 用普通光纤连接的长周期光栅对全光开关实验装置

实验测得级联 LPFG 的透射谱如图 6 所示(中间的虚线是单 LPFG 的透射谱). 此透射谱与图 5(d)的计算结果相同.

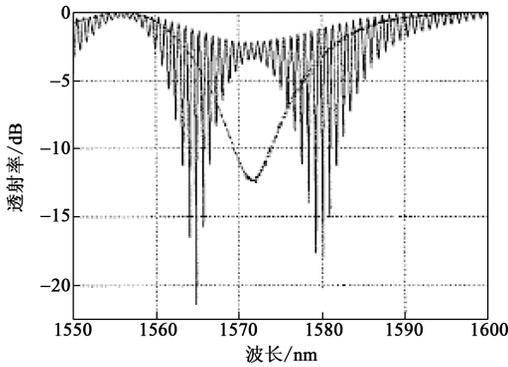


图6 级联 LPFG(实线)与单 LPFG(虚线)的透射谱

图 7(a)是一个单峰的透射光谱图<sup>[11]</sup>. 透射率的极大点 I 的波长为  $\lambda_{s1} = 1565.2\text{nm}$ ; 极小点 II 的波长为  $\lambda_{s2} = 1564.8\text{nm}$ . 图 7(b)是两个极值点的透射率随抽运强度变化的曲线, I 点的透射率(方点)随抽运光的增强而下降; 而 II 点的透射率(圆点)随抽运光的增强而上升. 开关幅度约 20%, 开关功率约  $1\text{GW}/\text{cm}^2$ , 即  $500\text{W}$ (设截面积  $S = 50\mu\text{m}^2$ ).

下面我们从理论上计算此光开关所需的开关功率. 对普通石英光纤, 抽运光引起的非线性光学效应可视为光克尔效应, 抽运光引起石英光纤的纤芯和包层的折射率发生不同的变化, 使信号光的纤芯模和包层模之间产生附加的相位差, 致使器件的透射谱向长波方向移动, 当透射谱移动半个谱宽时, 即可实现对信号光强的开关. 因为 LPFG 的折射率变化较小, 可以忽略, 只考虑光强引起的光纤折射率的变化. 考虑交叉相位调制, 在光纤的  $z$  点处折射率的变化为

$$\Delta n(z) = 2n_2 \frac{P(z)}{S} = 2n_2 \frac{P(0)e^{-\alpha z}}{S}, \quad (16)$$

式中  $P(0)$  为  $z=0$  处入射抽运光的功率,  $\alpha$  为掺铒光纤对抽运光的吸收系数,  $S$  为抽运光在光纤中的有效面积,  $n_2$  为非线性折射率系数. 当信号光通过非线性光纤连接的 LPFG 对后, 其相位变化可分为

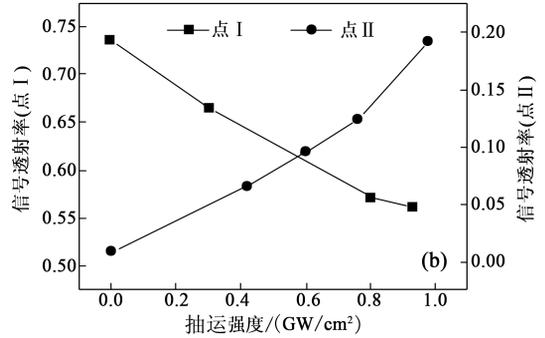
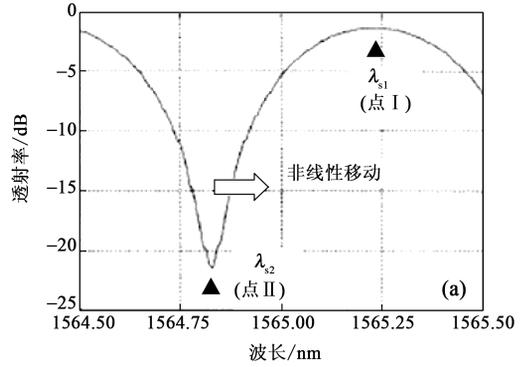


图7 波长  $1565.2\text{nm}$ (I点)和波长  $1567.8\text{nm}$ (II点)附近的透射特性(a)透射光谱图; (b)透射率随抽运强度变化的曲线

线性与非线性两部分:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 + \Delta\phi_{NL}. \quad (17)$$

式中,  $\Delta\phi_0$  由(15)式表述;  $\Delta\phi_{NL}$  为信号光传输间隔  $D$  长度后的非线性相位变化(假设  $D \gg L$ ). 由(16)式得到

$$\Delta\phi_{NL} = \int_0^D \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(z) dz = \frac{4\pi n_2 P(0)}{\omega \lambda S} (1 - e^{-\alpha D}). \quad (18)$$

实现开关的必要条件是  $\Delta\phi_{NL} = \pi$ , 由(21)式得到实现开关所需抽运光的阈值开关功率为

$$P_c = \frac{\lambda S \alpha}{4n_2 (1 - e^{-\alpha D})} \approx \frac{\lambda S \alpha}{4n_2}. \quad (19)$$

由此可见, 阈值开关功率与光纤的非线性折射系数成反比, 与光纤的截面积与吸收系数成正比.

根据(19)式, 对石英光纤采用数据  $n_2 = 2.6 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$ ,  $\lambda = 1550\text{nm}$ ,  $S = 30\mu\text{m}^2$ ,  $D = 35\text{cm}$  与  $\alpha = 0.012/\text{cm}$ , 得到 LPFG 对光开关的阈值光开关功率为  $P_c = 565\text{W}$ . 此结果与上节 Yoochan 等人的开关功率的实验数据相近.

## 6 掺铒石英光纤连接的 LPFG 对全光开关

为了进一步降低开关功率, 2008 年 Li 等<sup>[10]</sup>提

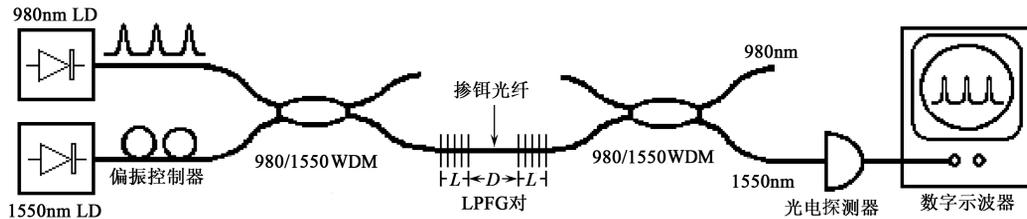


图 8 用一根掺铒光纤连接的 LPFG 对的全光开关装置

出用一根非线性光纤(掺铒光纤)连接 LPFG 对,构成低功率全光开关. 建议的实验装置如图 8 所示. 采用交叉抽运方式, 抽运光(脉冲)波长为 980nm; 信号光(连续)波长连续可调, 中心波长为 1550nm, 两者通过波分复用器(WDM)一起输入 LPFG 对. 再用第二个 WDM 将信号光和抽运光分开, 用示波器测量信号光的光开关特性.

对于掺铒( $\text{Er}^{+3}$ )光纤, 除了要考虑抽运光引起的折射率变化之外, 还必须考虑抽运光引起的光增益效应, 因此要从铒离子的三能级模型出发, 考虑离子受激吸收和受激辐射跃迁过程, 计算出光通过非线性光纤之后, 包括折射率变化和增益变化的复数传播常数的变化, 这就是所谓共振非线性.

假定两个 LPFG 是线性的, 只考虑连接两 LPFG 的光纤的非线性. 设信号光沿  $z$  方向传播, 其振幅是

$$E(z, \omega) = E_0(z, \omega) e^{i(\beta z - \omega t)}, \quad (20)$$

式中  $\beta$  是复数传播常数, 可表为

$$\beta = \beta' + i\beta'' = k_0 n + i \frac{g}{2}, \quad (21)$$

式中  $k_0$  是入射信号光的波数. 抽运光诱导的传播常数的变化为

$$\Delta\beta = \kappa_0 \Delta n + i \frac{\Delta g}{2}, \quad (22)$$

可以推得折射率变化  $\Delta n$  和增益变化  $\Delta g$  作为入射抽运光功率  $P_{p0}$  的函数的公式<sup>[12]</sup>.

因此在第二个 LPFG 处的非线性相移也是  $P_{p0}$  的函数, 即

$$\Delta\phi_{NL} = \int_0^L |\Delta\beta| dz = F(P_{p0}). \quad (23)$$

由以上(17)式和(23)式可以算得在不同抽运光下的掺铒光纤连接的 LPFG 对光开关在波长范围 1548—1552nm 的透射谱, 如图 9 所示. 作图所用数据为: 信号光波长  $\lambda = 1550\text{nm}$ ,  $n_2 = 3 \times 10^{-11} \text{cm}^2/\text{W}$ ,  $L = 50\text{mm}$ ,  $D = 35\mu\text{m}$ ,  $S = 30\mu\text{m}^2$ , 掺杂浓度  $N = 1.5 \times 10^{26} \text{m}^{-3}$ , 吸收系数  $\alpha = 0.012\text{cm}^{-1}$ ,  $\bar{\delta}n_{\text{eff}} = 0.75 \times 10^{-5}$ , 能级寿命  $\tau_2 = 10\text{ms}$ , 以及饱和功率和抽运先后的吸收截面等微

观参数.

由图 9 可见, 透射谱随抽运光功率的增加向长波方向移动, 抽运功率从低到高, 谱图从(a)到(e). 透射谱相对信号光波长(虚线位置)移动半个谱宽, 透射率从最高到最低, 实现了光开关. 阈值开关功率为 36.40mW. 可见掺铒光纤连接的 LPFG 对光开关的开关功率比用普通光纤连接的 LPFG 对光开关的开关功率降低了约 4 个数量级. 其根本原因是掺铒光纤的非线性折射系数比普通光纤的非线性折射系数高 5 个数量级.

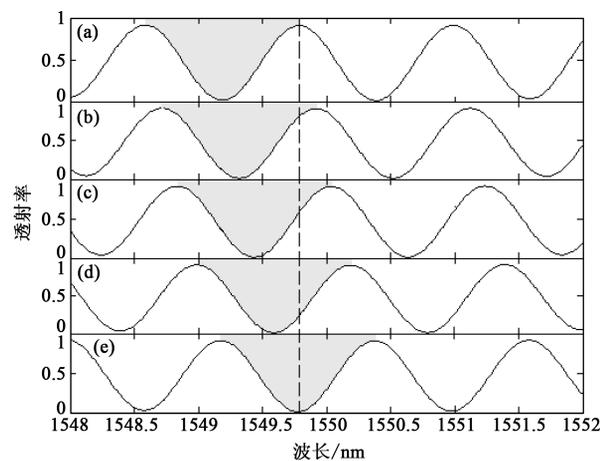


图 9 在不同抽运功率下 EDF 连接的 LPFG 对的透射谱. 抽运功率分别为 (a) 0mW; (b) 5.26mW; (c) 15.12mW; (d) 25.38mW; (e) 36.40mW

## 7 结论与讨论

如表 2 所示, 在本文中我们介绍了 5 种单光纤光栅全光开关, 以及 2 种用光纤连接的光纤光栅对全光开关. 从降低开关功率的要求来看, 对石英光纤光栅而言, 光栅对比单光栅要好(开关功率下降 1 个数量级); 对单光纤光栅而言, 稀土掺杂石英光纤光栅比常规石英光纤光栅要好得多(开关功率下降 2 个数量级); 对光纤光栅对而言, 用稀土掺杂石英光纤连接的光纤光栅对比用常规石英光纤连接的光纤光栅对要好得多(开关功率下降 4 个数量级). 总之,

用非线性光纤做的 FBG 光开关以及用非线性光纤连接的 LPFG 对光开关可能获得满足应用要求的低开关功率,有较大的实用价值.

表 2 各种非线性光纤光栅全光开关的开关功率及开关幅度比较

光纤光栅类型	驱动方式	开关功率	参考文献
石英光纤 FBG 光开关	交叉相位调制	4500W	[1]
石英光纤 FBG 光开关	自相位调制	4000W	[2]
石英光纤 LPFG 光开关	自相位调制	4500W	[10]
掺铒光纤 FBG 光开关	自相位调制	20mW	[4]
掺镱光纤 FBG 光开关	交叉相位调制	20mW	[5]
石英光纤连接石英 LPFG 对光开关	交叉相位调制	500W	[13]
掺铒光纤连接石英 LPFG 对光开关	交叉相位调制	36mW	[14]

可以设想,如果直接在一根非线性光纤(如掺 Yb<sup>3+</sup> 石英光纤)上,间隔适当距离(如 20mm),刻上两个相同结构的长周期光栅,构成同一非线性材料的非线性光纤光栅对开关,估计会使开关功率进一步降低,而且不需粘接、耦合,在工艺上更为简单.

值得注意的是,对不同脉宽的激光光源,存在着不同的非线性机制<sup>[15]</sup>. 对于普通光纤,在连续光或脉宽在皮秒以下的脉冲光作用下,材料的非线性以光克尔效应为主;对连续光还要考虑热膨胀和电致伸缩的影响.但在飞秒激光作用下,将以双光子效应为主,在这种情况下,石英光纤的非线性折射系数较大,可达到  $n_2 = 4 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W} (\lambda = 1.54 \mu\text{m})$ <sup>[14]</sup>,相应地,阈值开关功率大大降低,因此光栅光开关实验最好采用飞秒激光光源.

正像本文讨论的,对稀土掺杂光纤,还应考虑共振非线性.分析表明,除折射率增大的作用有利于降低开关功率外,增益增大也有利于降低开关功率.

在研制实用的光栅光开关器件时,除了要考虑器件的开关功率这一参量外,还应考虑器件的开关速度、插入损耗、工作波长等参量.而掺稀土的光纤材料往往响应速度较慢,吸收损耗较大,因此我们建议试用硫化物玻璃光纤,其非线性较高,开关速度较快,光学透明度也较好.

以上对光纤光栅光开关的分析和研究方法,同样适合于平面集成光栅的光开关.

### 参考文献

- [1] Larochelle S, Hibino Y, Mizrahi V *et al.* Electron. Lett., 1990, 26(18): 1459
- [2] Taverner D, Broderick G R, Richardson D J *et al.* Opt. Lett., 1998, 23(5): 328
- [3] Janos M, Arkwright J, Brodzeli Z. Electronics Letters, 1997, 33(25): 2150
- [4] Guan B O, Liu S Y. IEEE Proceeding, 2003, (8)7: 626
- [5] Stolen R H, Reed W A, Kim K S *et al.* J. of Lightwave Technology, 1998, 16(6): 1006
- [6] Kobayashi H, Kanbara H, Kogaa M. J. Appl. Phys., 1993, 74(6): 3683
- [7] Arkwright J W, Elango P, Whitbread T W *et al.* IEEE Photonics Techn Lett., 1996, 8: 408
- [8] Chu P L. IEEE Conference Proceedings, 1997, 1(10): 371
- [9] Eggleton B J, Slusher R E, Judkins J B *et al.* Opt. Lett., 1997, 22(12): 883
- [10] 李淳飞, 臧志刚. 中国激光, 2008, 35: 1[Li C F, Zang Z G. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35: 1(in Chinese)]
- [11] Yoonchan J, Byoungh L. IEEE Photon. Tech. Lett., 2000, 12(9): 1216
- [12] Thirstrup C, Shi Y, Palsdottir B. J. Lightwave Technol., 1996, 14: 732
- [13] Zhang B. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2010, 19 (3): 415
- [14] Dinu M, Quochi F, Garcia H. Appl. Phys. Lett., 2003, 82 (18): 2954
- [15] 李淳飞. 全光开关原理. 北京: 科学出版社, 2010. 8