

中红外 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 硫系玻璃光纤光栅光开关

张 倩^{1,2}, 张培晴^{1,2}, 曾江辉^{1,2}, 戴世勋^{1,2}, 王训四^{1,2}

- (1. 宁波大学 宁波高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;
2. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用熔融淬冷法制备了 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 硫系玻璃, 测试结果表明该玻璃在中红外波段具有良好的红外透过特性和极高的非线性, 采用 Z-扫描技术测试其中红外三阶非线性系数高达 $n_2=6.72\times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ @ $4 \mu\text{m}$ 。以此材料为基质, 设计了两种工作中红外波段的硫系玻璃光纤光栅光开关。利用分布时域传递矩阵法(TD-TMM)和非线性耦合方程模拟计算了光栅光开关的反射谱和波长偏移特性。研究表明, 通过调节输入光强可以灵活调节光纤光栅的中心波长向短波或长波方向移动, 进而可以获得光开关。在调制深度为 1×10^{-3} 的均匀硫系光纤光栅, 获得光开关的功率阈值约为 $1.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$, 当引入相移光栅后, 调制深度可以降低为 3×10^{-4} , 并且其光开关的功率阈值也降低到 $210 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 。

关键词: 硫系玻璃; 光纤; 光纤光栅光开关; 功率阈值

中图分类号: TN214 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0720002

Mid-infrared fiber grating optical switch of $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ chalcogenide glass

Zhang Qian^{1,2}, Zhang Peiqing^{1,2}, Zeng Jianghui^{1,2}, Dai Shixun^{1,2}, Wang Xunsi^{1,2}

- (1. Laboratory Infrared Material and Device, Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. Key Laboratory of Photoelectric Detecting Material and Device in Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract: $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ chalcogenide glass was prepared by a melt-quenching method. Testing results show that this glass possesses high nonlinear characteristics and wide infrared transmission windows in the infrared region. The third-order nonlinear coefficient was tested to be $n_2=6.72\times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ @ $4 \mu\text{m}$ by a Z-scan technique. Two kinds of chalcogenide glass infrared fiber grating optical switches were designed with this glass. The reflection spectrum and grating wavelength shift of optical switches were calculated with the distributed time-domain transfer matrix method (TD-TMM) and non-linear coupling equations. Results show that the Bragg wavelength can be flexibly tuned by modulating the input intensity and optical switch can be achieved. It was found that the power threshold is about $1.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$ for an optical switch with a modulation depth of 1×10^{-3} in a uniform chalcogenide Bragg fiber grating and the power threshold can be significantly reduced to about $210 \text{ MW}/\text{cm}^2$ in a phase-shift chalcogenide fiber grating with a modulation depth of only 3×10^{-4} .

Key words: chalcogenide glass; optical fiber; fiber grating optical switch; power threshold

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61307060); 浙江省基金项目(LY14F050001)

作者简介: 张倩(1992-), 女, 硕士生, 主要从事硫系光纤光栅的制备及应用方面的研究。Email: zhangqian509@163.com

导师简介: 张培晴(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外光学材料及器件方面的研究。Email: zhangpeiqing@nbu.edu.cn

0 引言

全光开关是未来全光通信和光计算机的关键器件,是未来光网络实现动态路由选择的基本器件,它可以加快信息的处理速度,适用于高速光信号处理。采用光纤光栅可以实现光开关,它具有体积小、波长选择性好、带宽范围大、附加损耗小、响应速度快、易于与光纤系统连接等诸多优点^[1];光纤光栅实现光开关的原理是利用光纤光栅的非线性,通过非线性效应来改变光纤的有效折射率,进而改变光纤光栅的反射波长,从而实现光开关。

1990年,Larochelle等人在实验室中首次发现了均匀布拉格光纤光栅的开关特性^[2]。1997年,Eggleton等人在长周期光纤光栅上观测出比布拉格光纤光栅更强的非线性效应,它可以在光强高于 5 GW/cm^2 时实现非线性光开关效应^[3]。2000年,Andrea等人利用 1 kW 抽运光作用于 20 mm ,中心波长为 $1\ 549.94\text{ nm}$ 的相移光纤光栅,实现了光开关现象^[4]。

以常规石英材料为基质的光纤光栅光开关已经在可见及近红外波段发挥了巨大的作用,但是由于石英材料非线性系数较小,通常需要较高的激光功率实现光开关。此外,受到石英材料红外截止波长短的限制,其在极其重要的中红外波段无法工作。因此,近年来能显著降低开关功率阈值并拓展其工作波段的硫系光纤光栅的研究逐渐受到人们的重视^[5]。硫系玻璃是以元素周期表VIA族中S,Se,Te元素为主,并引入一定量的其它类金属元素(Ga,Ge,As,Sb等)所形成的无氧玻璃^[6],其具有优良的中远红外透过性能(依据组成不同,其透过范围可从 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ 到 $12\sim 25\ \mu\text{m}$),折射率高(2.0~3.5),极高的非线性折射率系数 n_2 ($n_2=2\sim 20\times 10^{-18}\text{ m}^2/\text{W}$,是石英材料的 $100\sim 1\ 000$ 倍^[7])。利用其中红外透过性能及高的三阶非线性,硫系光纤光栅在中红外光纤传感^[8],光纤激光器^[9-10]及非线性应用等领域具有重要的应用价值。

由于硫系玻璃在紫外及可见光区域具有光敏特性,在激光的照射下会产生光致暗化、光致漂白、光致聚合等效应而产生折射率的改变,因此可以利用紫外及可见波段的激光制备硫系光纤光栅,并获

得较大的折射率调制度。1995年日本北海道大学的Tanaka等人首次报道了利用功率 5 mW ,波长 632.8 nm 的He-Ne激光在 As_2S_3 光纤中制备了光纤光栅,光栅的反射波长为 $1.55\ \mu\text{m}$,但光栅的热学稳定性较差,简单的退火操作便可将光栅擦除^[11]。2006年,悉尼大学的Eggleton等人利用低功率的 785 nm 连续激光干涉装置在单模 As_2S_3 光纤中制备了通信波段的光纤光栅,折射率调制度为 10^{-3} 量级^[12]。2011年麦吉尔大学的Ahmad等人利用 3 mW 的He-Ne激光全息干涉法在亚微米的 As_2S_3 拉锥光纤中获得了光纤光栅,折射率调制度为 10^{-2} ,进一步降低了利用连续激光刻写硫系光纤光栅的激光功率^[13]。2016年,Scholtz等人在 As_2S_3 硫系光纤光栅上模拟光开关,开关功率阈值为 1.8 GW/cm^2 ^[14]。

文中采用真空熔融淬冷法制备了 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 硫系玻璃,测量了其不同波长下的折射率、三阶非线性折射率系数和红外透过光谱,测试结果表明该玻璃在中红外波段具有极高的光学非线性,其 $4\ \mu\text{m}$ 附近的三阶非线性系数为 $n_2=6.72\times 10^{-18}\text{ m}^2/\text{W}$ 。以此材料为基质,文中设计了均匀光纤光栅和相移光纤光栅,利用分布时域传递矩阵法(TD-TMM)和非线性耦合方程模拟计算了两种硫系光纤光栅光开关的反射谱和波长偏移特性,通过改变输入光强,观察特定波长下的反射率情况,最终设计出具有较低光开关功率阈值的硫系光纤光栅光开关。

1 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 玻璃的制备及测试

采用真空熔融淬冷法制备了 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 硫系玻璃。制备好的样品利用金刚线切割机切割成 2 mm 薄片,抛光后进行光学测试。

采用红外线变角椭圆偏振光谱仪(R-VASE Mark II, J.A.Woollam, USA)测量样品在不同波长下的折射率,结果显示 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 硫系玻璃在 $2\sim 24\ \mu\text{m}$ 之间的折射率均高于3,如图1所示。采用分光光度计(PerkinElmer-Lambda 950 UV/VIS/NIR)和傅里叶红外光谱仪(Thermo Nicolet, Nexus 380, USA)测量样品红外透过光谱,如图2所示,它的透过窗口很宽,从 $1.5\sim 20\ \mu\text{m}$,而且没有明显的吸收带,具有良好的光学特性。

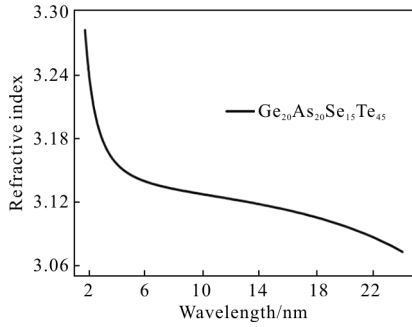


图 1 Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ 硫系玻璃折射率分布图

Fig.1 Infrared spectrum refractive index profile of

Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ chalcogenide glass

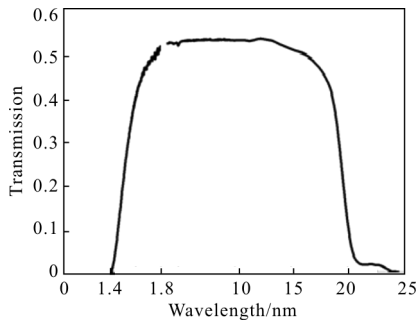


图 2 Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ 硫系玻璃红外光谱透过图

Fig.2 Infrared spectrum transmission of Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ chalcogenide glass

采用 Z 扫描技术研究样品在中红外波长的非线性，采用脉冲宽度 150 fs 和重复频率 1 kHz 的光参量放大系统 (Coherent, Legend Elite and OperA Solo) 作为泵浦源。飞秒激光利用 CaF₂ 透镜聚焦后作用于玻璃样品上，设定照射在玻璃样品表面的激光平均功率为 3(±0.1) mW，对应于透镜焦点上 8.1(±0.3) 和 4.4(±0.2) GW/cm² 的激光密度。使用高灵敏度热功率探针 (Laser Probe, RkP-575) 记录激光功率，图 3 给出了 4.0 μm 下 Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ 玻璃的封闭孔径 (CA)Z-扫描测试，图中曲线显示了谷和峰位置，

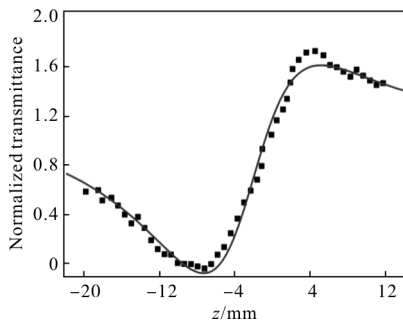


图 3 Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ 玻璃的封闭孔径 (CA)Z-扫描测试 (λ=4.0 μm)

Fig.3 Closed-aperture Z-scans of the Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ chalcogenide glass at λ=4.0 μm

表现出自聚焦现象，即在中红外波长的正信号的玻璃的非线性折射率 (n_2)，由已知的拟合程序得到，Ge₂₀As₂₀Se₁₅Te₄₅ 玻璃在 4.0 μm 的非线性折射率估计值为 $n_2=6.1727 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 。样品玻璃的高非线性显示其在中红外非线性光学器件中有显著的潜力。

2 光纤光栅非线性耦合模理论

光纤纤芯和包层的折射率分别为 n_1 和 n_2 ，光纤在周期性的紫外光照射下，纤芯区的折射率发生了周期性的增加，成为 $n+\Delta n$ ，其中 Δn 为由紫外光所引起的周期性折射率变化， Δn 一般可表示为：

$$\Delta n(r, \phi, z) = \Delta n_0(r, \phi, z) + \Delta n_1(r, \phi, z) \times$$

$$\cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + 2 \int_0^z \varphi(\zeta) d\zeta \right] \quad (1)$$

$$\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2}$$

式中： Δn_0 为光致折射率变化的直流分量； Δn_1 为光致折射率变化的幅度，均为 z 的缓变函数， Δn_0 和 Δn_1 随 z 的变化反映了光栅的折射率调制结构； $\varphi(\zeta)$ 用来描述沿光纤轴向光栅周期的变化情况。

考虑一段光纤光栅，其轴向沿 z 方向，那么光栅的折射率可以表示为：

$$n(z) = \bar{n} + \Delta n(z) \cos \left[\frac{2\pi z}{\Lambda} + \varphi(z) \right] + n_2 |E(z)|^2 \quad (2)$$

式中： \bar{n} 为光栅平均折射率； $\Delta n(z)$ 为折射率周期变化的幅度即调制深度； $E(z)$ 为电场振幅； Λ 为光栅周期； $\varphi(z)$ 为光栅中的相移； n_2 为 Kerr 非线性系数，光栅的中心波长 $\lambda_B = 2\bar{n}\Lambda$ ，在频域上对应为 $k_B = \pi c \bar{n} / \Lambda$ 。

耦合模式理论是基于假设 $\Delta n(z)$ 很小时得到的，光纤光栅的电场由 2 个反向传播的 LP₀₁ 模式组成，内部的电场可以表示为：

$$E(z, t) = A_+(z, t) e^{-j(\omega_0 t - k_0 z)} + A_-(z, t) e^{-j(\omega_0 t - k_0 z)} \quad (3)$$

式中： A_+ 和 A_- 代表前向和后向传输波函数，沿着 z 轴缓慢变化； ω_0 是光载波频率，其波数为 $k_0 = 2\pi/\lambda_B$ ，定义频率失谐量为 $\delta = k_0 - k_B$ 。

用非线性耦合模方程 (NCME) 来描述前向和后向传输波：

$$i \frac{\partial A_+}{\partial z} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial A_+}{\partial t} + \delta A_+ + \kappa A_- + \gamma (|A_+|^2 + 2|A_-|^2) A_+ = 0 \quad (4)$$

$$-i \frac{\partial A_-}{\partial z} + i \frac{\bar{n}}{c} \frac{\partial A_-}{\partial t} + \delta A_- + \kappa A_+ + \gamma (|A_-|^2 + 2|A_+|^2) A_- = 0$$

式中： δ 为失谐参数。线性耦合系数 κ 和非线性耦合系数 γ 分别表示为：

$$k(z) = \frac{\pi \Delta n(z)}{\lambda_B}, \gamma = \frac{2\pi}{\lambda_B} n_2 \quad (5)$$

在非线性系统固定状态下，既考虑入射波为连续波或准连续波，或者与入射脉冲脉宽相比其在光栅中的传输时间较大时的情况。

把公式(3)代入麦克斯韦方程组，并利用 A_+ 和 A_- 是时间的慢变化函数，耦合方程又可表示为：

$$\begin{aligned} -i \frac{\partial A_+}{\partial z} &= \delta A_+ + \kappa A_- + \gamma(|A_+|^2 + 2|A_-|^2) A_+ \\ i \frac{\partial A_-}{\partial z} &= \delta A_- + \kappa A_+ + \gamma(|A_-|^2 + 2|A_+|^2) A_- \end{aligned} \quad (6)$$

这组方程代表光通过光栅结构的传输特性与时间无关^[15]。

3 数值模拟结果与讨论

3.1 均匀光纤光栅

文中采用分布时域传递矩阵法(TD-TMM)和利用 MATLAB 编程模拟计算均匀疏系光纤光栅的传输特性。传递矩阵法是将电磁波在空间位置展开，把麦克斯韦方程组化成传输矩阵，从而通过求解本征值获得电磁波传播规律。它把光纤光栅分成一些具有相同传输特性的部分，而总的传输特性由各部分的传输矩阵相乘获得。该方法编程简单，运算量小，对于介电材料周期性排列的结构尤其有效，因而被广泛采用。研究中的光纤光栅长度 $L=0.01$ m，中心波长 $\lambda_B=4 \mu\text{m}$ ，光纤的平均折射率 $\bar{n}=3.15$ ，调制深度 $\Delta n=1 \times 10^{-3}$ ，Kerr 非线性系数取典型值 $n_2=6.72 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ，周期 $\Lambda=806.45$ nm。

均匀光纤光栅是一种基本的光纤光栅，它的折射率变化幅度与光纤周期均是常数。图 4 为均匀光纤光栅的示意图及其折射率变化示意图。

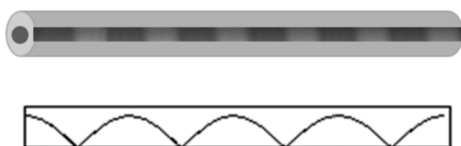


图 4 均匀光纤光栅

Fig.4 Uniform fiber grating

在外界输入光的作用下，光纤光栅产生克尔效应， $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 光纤的折射率 n 随着入射光强 I 变化

而变化，有 $n=n_0+n_2I$ ，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，由光栅的中心波长公式可以得到光强引起光栅波长的位移量。由 $\lambda_B=2n_2\Lambda I$ 得到，光强增大将使光栅波长红移，如图 5(a) 所示方向的移动，如果光栅波长正好移动半个谱宽，则光的透射率就从最低变为最高，从而实现了一次开关转换。不同输入光强下 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 光纤光栅的光谱响应如图 5(a) 所示。图 5(b) 给出了带宽内一点在不同光强照射下的反射率变化，反射率从最高到最低实现了在这一点上的开关转换。获得的光开关的功率阈值约为 $1.62 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。

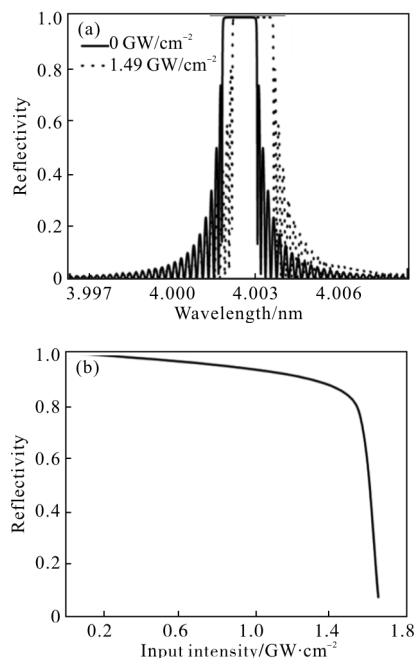


图 5 均匀光纤光栅发射谱

Fig.5 Reflectance spectrum of uniform fiber grating

笔者进一步研究了均匀光纤光栅中心波长随输入功率变化而变化的特性，图 6 为输入光强不断增加

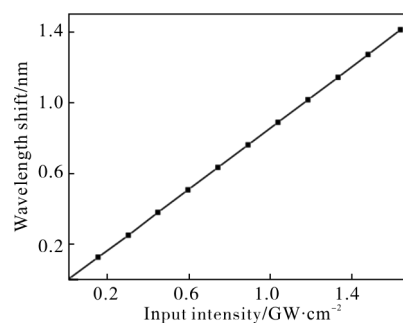


图 6 布拉格波长随输入光强变化的曲线

Fig.6 Curve of Bragg wavelength vs the input intensity

加时光纤光栅光谱的变化结果, 并由此得到的线性拟合曲线。可以看出, 随着输入光强的增加, 光栅中心波长也逐渐向长波方向移动, 当光强达到 1.4 GW/cm^2 时, 与光纤光栅初始波长相比中心波长偏移了 1.1 nm , 获得了 1.1 nm 的可调谐范围。

3.2 相移光纤光栅

在均匀布拉格光纤光栅的基础上, 文中引入一个微小的缺陷以实现相移光纤光栅。相移光纤光栅是在均匀的折射率余弦调制光栅中, 在某个或某些位置上出现相位偏移, 结果在反射谱中出现一个较窄的缺口, 可以有多个相移, 相应会出现多个缺口。图 7 是相移光纤光栅示意图及其折射率变化示意图。

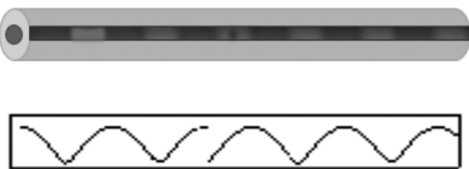


图 7 相移光纤光栅

Fig.7 Phase-shifted fiber grating

文中采用分布时域传递矩阵法 (TD-TMM) 和利用 MATLAB 编程模拟计算相移硫系光纤光栅的传输特性。研究中的光纤光栅长度 $L=0.01 \text{ m}$, 中心波长 $\lambda_B=4 \mu\text{m}$, 光纤的平均折射率 $\bar{n}=3.15$, 调制深度 $\Delta n=3 \times 10^{-4}$, Kerr 非线性系数取典型值 $n_2=6.72 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$, 周期 $\Lambda=806.45 \text{ nm}$ 。

相移光纤光栅具有较陡峭的反射特性曲线, 其反射和透射随波长的变化更加敏感, 因此对光栅引入相移可以进一步减小光开关的阈值。计算了引入相位差 π 时的 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 相移光纤光栅反射谱特性。图 8(a) 展示了不同输入光强下的相移光纤光栅反射特性曲线。从图中可以观察到外界光强变化引起光纤光栅的非线性效应, 随着光强的增大, $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 相移光纤光栅的波长向长波方向移动, 当移动波长的 $1/4$ 时, 就实现了光开关的一次开—断转换。图 8(b) 给出了带宽内一点在不同光强照射下的反射率变化, 反射率从最高到最低实现了在这一点上的开关转换。最终获得光开关的功率阈值约为 210 MW/cm^2 , 相比于功率阈值 1.6 GW/cm^2 的

均匀光纤光栅光开关, 相移光纤光栅光开关表现出更好的开关效应。

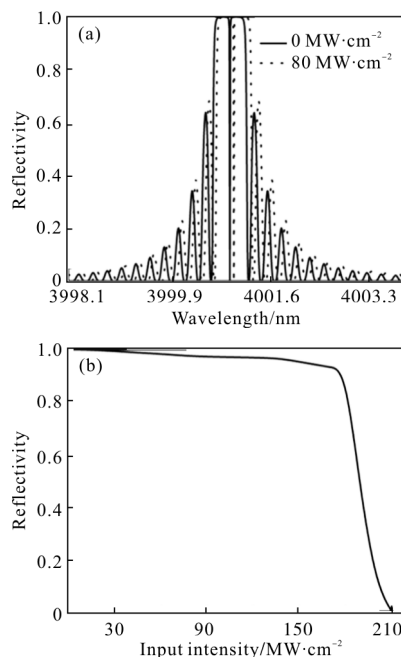


图 8 相移光纤光栅反射谱

Fig.8 Reflectance spectrum of phase-shifted fiber grating

笔者也进一步研究了相移布拉格光纤光栅中心波长随输入功率变化而变化的特性, 仿真测试了光纤光栅的反射谱, 图 9 为输入光强不断增加时光纤光栅光谱变化的仿真结果, 并由此得到线性拟合曲线。由图可以看出, 随着输入光强的增加, 相移光纤光栅中心波长也逐渐向长波方向移动, 当光强达到 1.4 GW/cm^2 时, 与光纤光栅初始波长相比中心波长偏移了 1.7 nm , 获得了 1.7 nm 的可调谐范围。

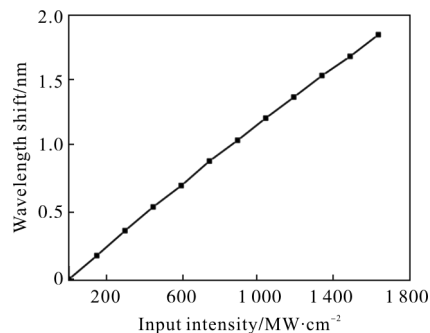


图 9 布拉格波长随输入光强变化的曲线

Fig.9 Curve of Bragg wavelength vs the input intensity

由均匀和相移光纤光栅的模拟结果分析得到, 相比于石英光纤光栅光开关, 两者都能获得较好的

开关响应。调制深度为 1×10^{-3} 的均匀硫系光纤光栅, 获得光开关的功率阈值约为 1.6 W/cm^2 ; 调制深度为 3×10^{-4} 的相移硫系光纤光栅, 其获得光开关的功率阈值约为 210 MW/cm^2 。在输入光强 1.4 GW/cm^2 的情况下, 均匀光纤光栅的中心波长偏移了 1.1 nm , 相移光纤光栅的中心波长偏移了 1.7 nm 。

4 结 论

制备了 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 硫系玻璃, 实验测试其具有较高的三阶非线性、较高的折射率和优良的红外透过性能, 是制备硫系光纤光栅光开关的可行材料。以此硫系玻璃为基质材料, 理论设计了均匀和相移这两种硫系光纤光栅, 并用它来模拟光开关。通过外界输入光强的变化, 观察两种硫系光纤光栅光开关的波长偏移及反射谱变化, 得到特定波长下的反射谱。研究发现, 通过调节输入光强可以灵活调节光纤光栅的中心波长向短波或长波方向移动, 进而可以实现光开关, 模拟调制深度为 1×10^{-3} 的均匀硫系光纤光栅, 获得光开关的功率阈值约为 1.6 GW/cm^2 , 引入相移后, 模拟调制深度为 3×10^{-4} 的相移硫系光纤光栅, 其获得光开关的功率阈值降低为 210 MW/cm^2 。文中的研究表明 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 硫系光纤光栅实现光开关是可行的, 对于发展中红外光纤光栅器件具有较好的指导意义。

参考文献:

- [1] Tao Zisheng, Huang Yonglin. Optical switches based on FEG with anisotropic cladding [J]. *Study on Optical Communications*, 2016, 42(1): 35–37. (in Chinese)
陶子盛, 黄勇林. 基于包层各向异性 FBG 的光开关[J]. 光通信研究, 2016, 42(1): 35–37.
- [2] Larochelle S, Hibino Y, Mizrahi V, et al. All-optical switching of grating transmission using cross-phase modulation in optical fibres[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(18): 1459–1460.
- [3] Eggleton B J, Slusher R E, Judkins J B, et al. All-optical switching in long-period fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 883–885.
- [4] Melloni A, Chinello M, Martinelli M, et al. All-optical switching in phase-shifted fiber gratings [J]. *Filtration Industry Analyst*, 2000, 12(1): 42–44.
- [5] Sun Lihong, Wang Xunsi, Zhu Qingde, et al. Advance on the exploration and evaluation of high nonlinear chalcogenide glasses [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 7–15. (in Chinese)
孙礼红, 王训四, 祝清德, 等. 高非线性硫系玻璃开发及其理论研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 7–15.
- [6] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Li Hua, et al. Application of the chalcogenide glass in modern infrared thermal imaging systems[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 449–455. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 李华, 等. 硫系玻璃在现代红外热成像系统中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 449–455.
- [7] Xu Yantao, Guo Haitao, Lu Min, et al. Preparation and properties of low-loss core-cladding structural Ge-Sb-Se chalcogenide glass fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 182–187. (in Chinese)
许彦涛, 郭海涛, 陆敏, 等. 低损耗芯包结构 Ge-Sb-Se 硫系玻璃光纤的制备与性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 182–187.
- [8] Fu Qiang, Zhang Xin. Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1467–1471. (in Chinese)
付强, 张新. 基于硫系玻璃的中波红外光学系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1467–1471.
- [9] Dong Fanlong, Zhao Fangzhou, Ge Tingwu, et al. Optimization of beam quality for all-fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 844–849. (in Chinese)
董繁龙, 赵方舟, 葛廷武, 等. 全光纤激光器光束质量的优化[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 844–849.
- [10] Liu Youqiang, Cao Yinhua, Li Jing, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1279–1287. (in Chinese)
刘友强, 曹银花, 李景, 等. 激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1279–1287.
- [11] Tanaka K, Toyosawa N, Hisakuni H. Photoinduced Bragg gratings in As_2S_3 optical fibers [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(19): 1976–1978.
- [12] Pudo D, Mägi E C, Eggleton B J. Long-period gratings in chalcogenide fibers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 3763–3766.
- [13] Ahmad R, Rochette M, Baker C. Fabrication of Bragg gratings in subwavelength diameter As_2Se_3 chalcogenide wires

- [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2886–2888.
- [14] Senderáková D. Analysis of spectral response of optical switching devices based on chalcogenide bistable fiber Bragg gratings[C]//SPIE, 2015, 9450: 94501K.
- [15] Yang Guangqiang, Guo Yong, Song Ji'en, et al. Nonlinear switching characteristics of fiber Bragg gratings [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25 (2): 94–97.(in Chinese)
- 杨广强, 郭勇, 宋继恩, 等. Bragg 光纤光栅非线性开关特性研究[J]. 半导体光电, 2004, 25(2): 94–97.