文章编号:1004-4213(2011)02-0178-8

旋转光纤圆起偏器的特性分析

吴明华,孟义朝
(上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室,上海 200072)

摘　要:基于旋转光纤耦合模理论,对窄带和宽带旋转光纤圆起偏器的特性进行了计算分析.研究了注入光的偏振态、光纤固有线双折射和旋转速率对窄带圆起偏器最小工作长度的影响,并借助多包层光纤的分析方法,分析了旋转光纤各参量变化对宽带圆起偏器工作带宽的影响.结果表明:窄带圆起偏器的最小工作长度与光纤固有线双折射和光纤旋转速率有关,而与注入光的偏振态无关;改变光纤旋转速率可调节宽带圆起偏器的工作带宽,改变应力区到纤芯的距离可改变宽带圆起偏器的中心波长.

关键词:光纤光学;旋转光纤;耦合模理论;圆起偏器;计算分析
中图分类号:TN253　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/gzxb20114002.0178

0　引言

光学圆起偏器是属于偏振光学范畴的重要光子器件,能够在特定波长范围内将任意偏振态的光转换为圆偏振光,在激光技术、光通信、光传感和光学测试等领域具有重要的应用价值[1].光学圆起偏器通常由块状光学器件组合而成(线起偏器+$\lambda/4$ 光学波片),存在稳定性差、尺寸大、插入损耗大等方面的不足.

针对块状光学圆起偏器存在的不足,一些学者提出全光纤圆起偏器的改进方案,包括:1)类似于体光学器件,由光纤线起偏器和 $\lambda/4$ 光纤波片串联而成;2)由一段高速旋转光纤构成.

相关研究具体阐述为:在拉制熊猫(Panda)或领结(Bow-tie)等内部应力型双折射光纤时,由慢到快旋转光纤预制棒,拉制成宽带光纤型 $\lambda/4$ 波片[2],可以实现线偏振光到圆偏振光的转换[3-5];通过旋转局部加热的非圆形芯光纤,使纤芯沿光纤的轴向呈螺旋状结构,形成具有偏振相关滤波特性的手性光纤光栅[6-9];在拉丝时高速旋转二应力区高线双折射光纤预制棒,螺距适中,形成类似于长周期光纤光栅的单波长光纤圆起偏器[10].上述改进方案均是基于高线双折射保偏光纤的研究,虽然旋转可以引入圆双折射,但由于旋转光纤存在较高的固有线双折射,单模旋转光纤的两个正交的本征传导模为椭圆偏振模,不可能实现真正的圆偏振本征模传输[11-13].

本文采用旋转光纤耦合模理论和多包层光纤的分析方法,对单模低线双折射高速旋转光纤(含三个掺杂应力区)的偏振变换特性进行了计算分析.这种旋转光纤的本征传导模为圆偏振模,根据带宽的不同可以分为两类:1)窄带旋转光纤圆起偏器.旋转会导致纤芯中左旋或者右旋圆偏振光中的一个本征模在某一特定的波长与低阶包层模发生耦合,而另一个本征模则可以在纤芯中稳定传输(传输损耗较小),从而实现基于长周期光纤光栅的窄带圆起偏器.2)宽带旋转光纤圆起偏器.旋转会导致左旋和右旋圆偏振光的截止波长不同,从而形成一个单圆偏振窗口,在这个窗口内只有一个圆偏振模作为导模传输,另一个圆偏振模作为高阶模被损耗掉,从而达到圆起偏的目的.

1　旋转光纤耦合模理论

如图 1,(x, y, z),(x_0, y_0, z_0)分别表示旋转光纤的旋转坐标系和实验室固定坐标系.令(x, y)分别与光纤固有线双折射的快、慢轴重合.

假定光纤无损耗又无内在的圆双折射,旋转坐标系中的耦合模方程可表示为[14-15]

$$\mathrm{d}E/\mathrm{d}z=\boldsymbol{KE};\boldsymbol{E}=[E_x\ E_y]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}\mathrm{j}(\Delta\beta/2) & \varepsilon \\ -\varepsilon & -\mathrm{j}(\Delta\beta/2)\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\Delta\beta=\beta_y-\beta_x=2\pi(n_y-n_x)/\lambda \tag{3}$$

式中,E_x、E_y 分别代表光波电场沿光纤主轴 x 轴和

基金项目:上海市重点学科和科委重点实验室项目(No. S30108,No. 08DZ2231100)资助
第一作者:吴明华(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为旋转光纤及相关器件. Email:wuming424@126.com
导师(通讯作者):孟义朝(1970-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为特种光纤、光纤通信及光纤传感. Email:myc@shu.edu.cn
收稿日期:2010-09-17;**修回日期**:2010-11-01

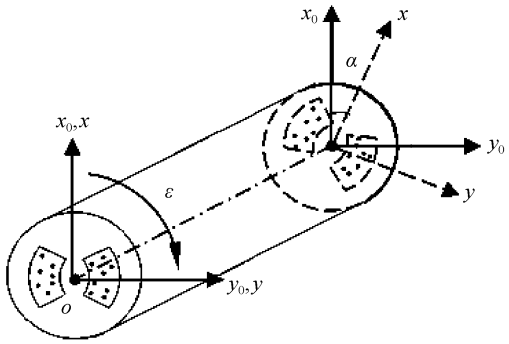


图 1　旋转光纤的实验室及旋转坐标系

Fig. 1　Laboratory and rotation coordinate systems of the spun fiber

y 轴的横向分量，K 是光纤传输矩阵，β_x、β_y 为沿 x、y 轴传输的线本征模的传播常量，$\Delta\beta$ 表示光纤的固有线双折射，即单模光纤中两个互相正交的偏振基模 HE_{11}^{x} 和 HE_{11}^{y} 沿光纤轴向传输时的传播常量差，λ 是光在自由空间的波长，n_x 和 n_y 是两个正交偏振基模的有效折射率，ε 表示光纤的旋转速率，单位为 rad/m. 通过矩阵变换，将方程(1)进行对角化处理

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{OW};\boldsymbol{W}=[W_1\ W_2]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{O}=\begin{bmatrix}\cos\varphi & \mathrm{j}\sin\varphi\\ \mathrm{j}\sin\varphi & \cos\varphi\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\varphi=(1/2)\arctan(2Q);Q=\varepsilon/\Delta\beta \tag{6}$$

把方程(4)带入到方程(1)中得

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}z=\Lambda W \tag{7}$$

$$\Lambda=O^{-1}KO=\begin{bmatrix}\mathrm{j}g & 0\\ 0 & -\mathrm{j}g\end{bmatrix} \tag{8}$$

$$g=\sqrt{(\Delta\beta/2)^2+\varepsilon^2} \tag{9}$$

由式(8)可知，Λ 为对角矩阵，旋转不会引起 W_1 和 W_2 间的耦合，所以 W_1 和 W_2 是旋转光纤中的本征传导模. 如果注入光纤的偏振光与一个本征传导模相匹配，就会以该本征模的形式在光纤内独立稳定地传输；如不相匹配，那么将会激发出两个本征传导模. Q 为圆双折射和线双折射的比值，对于高速旋转的低线双折射光纤，$Q\gg1$，$\varphi=\pi/4$，本征传导模为圆偏振模. 假设光纤旋转方向为顺时针(沿着光的传输方向观察)，实验室坐标系下以圆偏振模式表示的耦合模方程为[10]

$$\mathrm{d}A/\mathrm{d}z=-\mathrm{j}\Lambda' A \tag{10}$$

$$\Lambda'=\begin{bmatrix}\beta_0+g & 0 & \varepsilon & 0\\ 0 & \beta_0-g & 0 & \varepsilon\\ \varepsilon & 0 & \beta_{\mathrm{cl}}-\varepsilon & 0\\ 0 & \varepsilon & 0 & \beta_{\mathrm{cl}}+\varepsilon\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$A=[\,A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}\quad A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}\quad A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{r}}\quad A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{l}}]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

$$\beta_0=\beta_{\mathrm{co}}+\Delta\beta \tag{13}$$

式中 β_{co}、β_{cl} 分别表示纤芯基模、包层模的传播常量，$A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}$、$A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}$、$A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{l}}$、$A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{r}}$ 分别表示纤芯基模与包层模中左旋和右旋圆偏振光分量，由式(11)可知，旋转光纤纤芯中左旋和右旋圆偏振光的传播常量为 β_0-g 和 β_0+g，包层中左旋和右旋圆偏振光的传播常量为 $\beta_{\mathrm{cl}}+\varepsilon$ 和 $\beta_{\mathrm{cl}}-\varepsilon$.

2　窄带旋转光纤圆起偏器的计算分析

2.1　窄带旋转光纤圆起偏器的工作原理

旋转多应力区光纤会在光纤内部形成周期性的折射率调制，耦合条件为

$$\lambda_{\mathrm{res}}=(n_{\mathrm{core}}-n_{\mathrm{clad}})P \tag{14}$$

式中 n_{core} 为纤芯基模的有效折射率，n_{clad} 为包层模的有效折射率，λ_{res} 为谐振波长，$P=2\pi/\varepsilon$ 为旋转光纤的螺距(旋转周期). 当满足耦合条件式(14)时，纤芯基模将会耦合到同向传输的包层模，包层模的能量会因光纤的弯曲等扰动而极易被损耗掉.

由于旋转光纤纤芯和包层中左旋和右旋圆偏振模的传播常量都不同，根据耦合条件，旋转光纤的传输谱将出现两个损耗峰，对应的中心波长分别为 λ_{L} 和 λ_{R}. 左旋和右旋偏振光的 n_{core} 和 n_{clad} 可由式(11)中的传播常量求出，$\Delta\beta=10$rad/m，$P=727$ μm 时的传输谱如图 2. 在波长 1 550 nm 处是右旋圆偏振光所对应的损耗峰，而在 1 358nm 处是左旋圆偏振光所对应的损耗峰，消光比达到 30 dB 时的带宽大约为 7 nm. 在中心波长 λ_{L} 附近，左旋圆偏振光将被耦合到包层中损耗掉，而右旋圆偏振光在纤芯中无损耗地通过；在中心波长 λ_{R} 附近右旋圆偏振光被损耗掉，左旋圆偏振光可以无损耗地通过，从而实现圆起偏的功能.

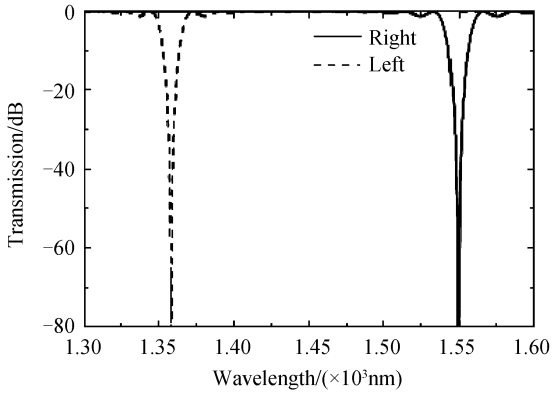


图 2　窄带圆旋转光纤圆起偏器的传输谱

Fig. 2　The transmission spectrum of narrowband spun fiber circular polarizer

不同长度的窄带光纤圆起偏器的传输谱如图 3，实线对应右旋圆偏振光的损耗峰，虚线对应左旋圆偏振光的损耗峰.

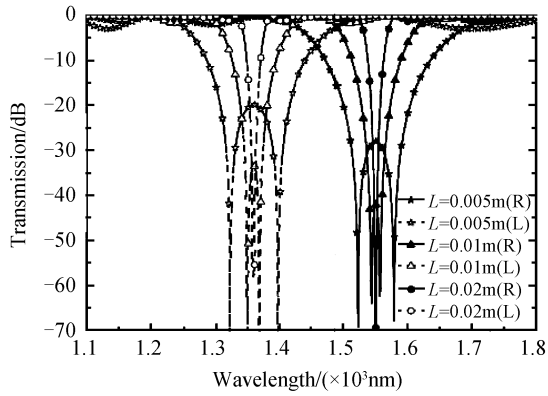


图3 不同光纤长度时窄带旋转光纤圆起偏器的传输谱

Fig. 3 The transmission spectrum of narrowband spun fiber circular polarizer for different fiber length

可见,光纤长度越小,圆起偏器的带宽越大,但是小到一定程度,损耗峰发生分裂,并且左旋和右旋圆偏振光的损耗峰将发生重叠.参量的选择要顾及带宽和消光比两个指标.

计算表明,选择不同的旋转率即可以实现工作于其他波段的窄带圆起偏器.如图4,当 $P=677\ \mu\mathrm{m}$ 时,λ_{L} 和 λ_{R} 分别为 1 258 nm 和 1 449 nm.

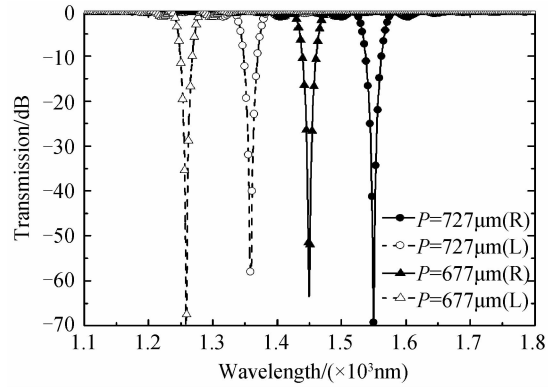


图4 不同旋转速率时窄带旋转光纤圆起偏器的传输谱

Fig. 4 The transmission spectrum of narrowband spun fiber circular polarizer for different spin rate

2.2 窄带旋转光纤圆起偏器的最小工作长度与注入光偏振态的关系

只考虑右旋圆偏振光满足耦合条件时,假定光纤长度 $z_{\mathrm{L}}=2$ m,旋转方向为顺时针,光纤固有线双折射 $\Delta\beta=10$ rad/m,旋转速率 $\varepsilon=7\ 500$ rad/m,任意偏振态的注入光表示如下

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{co}}(0)=[\cos\theta \quad \sin\theta\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}] \tag{15}$$

矩阵 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{co}}(0)$ 中两个矩阵元素分别表示纤芯基模中 x,y 偏振分量的幅度 $E_{\mathrm{co}}^{x}(0)$ 和 $E_{\mathrm{co}}^{y}(0)$,θ 为光矢量与 x 轴的夹角,δ 为 x 与 y 偏振分量间的相位差.包层模中 x,y 偏振分量的幅度 $E_{\mathrm{cl}}^{x}(0)$ 和 $E_{\mathrm{cl}}^{y}(0)$ 为零,由式(4)可知

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{co}}(0)=\boldsymbol{O}^{-1}\boldsymbol{E}_{\mathrm{co}}(0) \tag{16}$$

矩阵 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{co}}(0)$ 中两个矩阵元素分别表示纤芯基模中右旋和左旋圆偏振分量的幅度 $A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}(0)$ 和 $A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}(0)$,包层模中右旋和左旋圆偏振分量的幅度 $A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{r}}(0)$ 和 $A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{l}}(0)$ 为0,故以圆偏振模表示的初始条件为

$$\boldsymbol{A}(0)=[\ A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}(0) \quad A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}(0) \quad 0 \quad 0\ ]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

采用四阶 Runge-Kutta 法数值求解方程(10),初始值由式(17)确定,即可以得到各模式功率沿光纤长度的变化曲线.

线偏振光注入时,θ 分别取 $\pm\pi/2$、$\pm\pi/4$,$\delta=0$.传输功率曲线如图5,$A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}$、$A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}$ 分别代表纤芯中左旋和右旋圆偏振光的光功率,$A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{l}}$、$A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{r}}$ 分别代表包层中左旋和右旋圆偏振光的光功率.

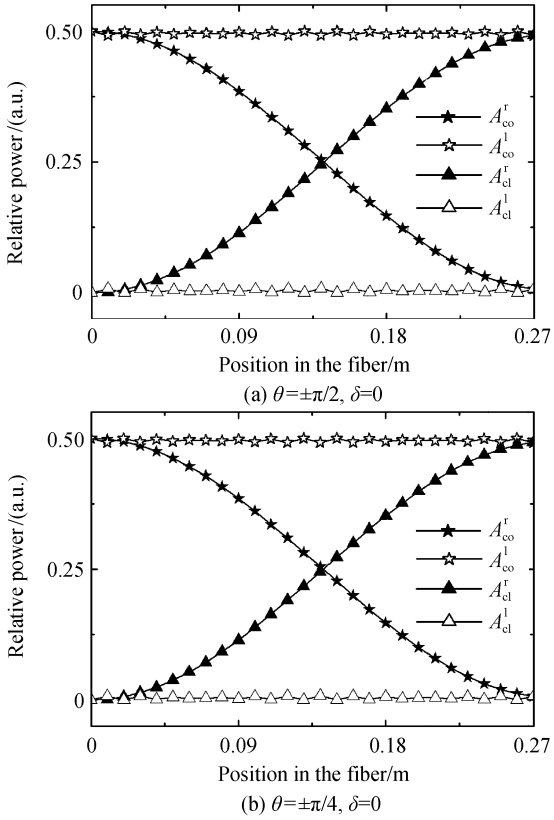


图5 不同线偏振光注入时的传输功率曲线

Fig. 5 Transmission power along the spun fiber for different incident linear polarized light

从图5可知,四种情况下所激发的两个本征传导模 $A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}$、$A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}$ 的能量相等,且 $A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}$ 和 $A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}$ 都是在0.27 m处发生了能量的全部转换,而 $A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{l}}$ 可以无损耗地通过,说明窄带圆起偏器的最小工作长度 $L_{\min}$ 与注入线偏振光的振动方向无关.

左旋圆偏振光注入时,$\theta=\pi/4$,$\delta=-\pi/2$.传输功率曲线如图6(a),不会引起模式之间的能量转换,右旋圆偏振光注入时,$\theta=\pi/4$,$\delta=\pi/2$.传输功率曲线如图6(b),$A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}$ 的能量在0.27 m处全部转化为 $A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{r}}$ 而损耗掉,故在旋转光纤输出端无输出.

椭圆偏振光注入时,$\theta=\pi/4$,δ 分别取 $\pm\pi/8$.传输功率曲线如图7(a)和(b),虽然不同相位差的椭圆偏振光所激发的 $A_{\mathrm{co}}^{\mathrm{r}}$ 和 $A_{\mathrm{cl}}^{\mathrm{r}}$ 的能量不同,但是 $L_{\min}$

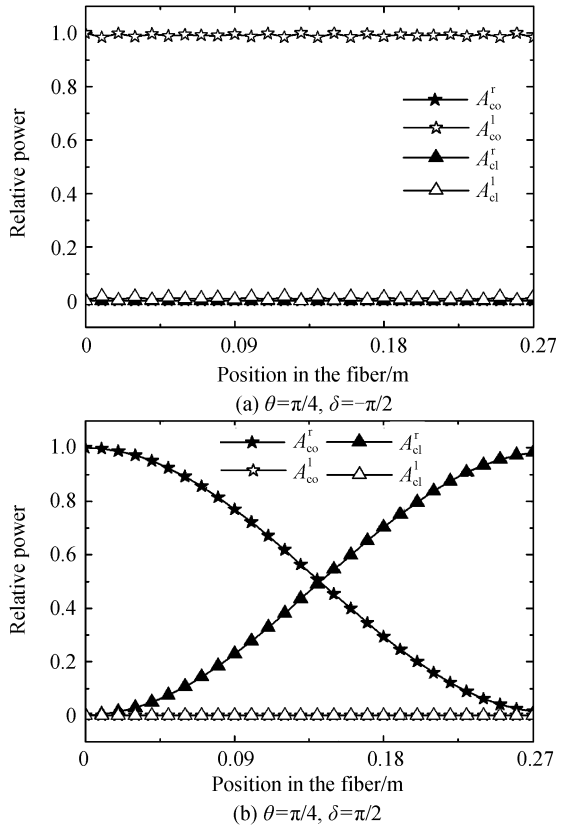


图 6　不同圆偏振光注入时的传输功率曲线

Fig. 6　Transmission power along the spun fiber for different incident circularly polarized light

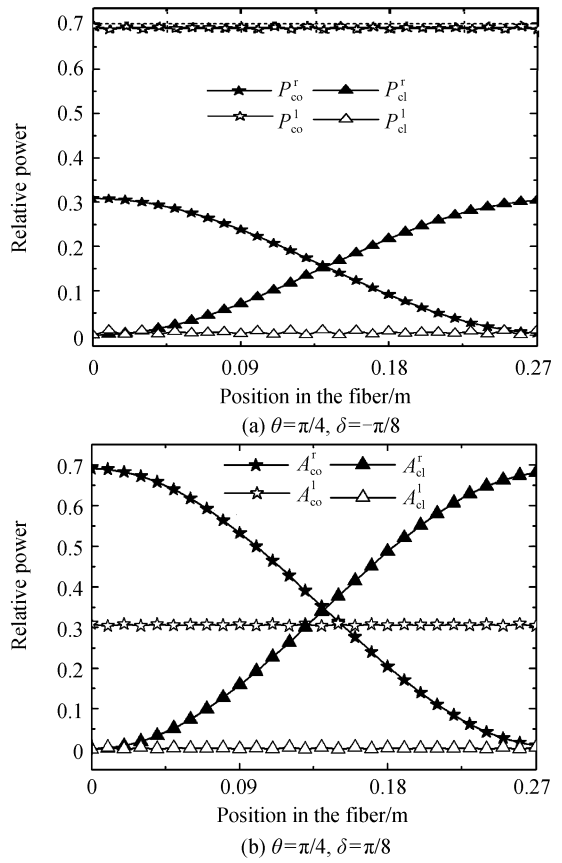


图 7　不同椭圆偏振光注入时的传输功率曲线

Fig. 7　Transmission power along the spun fiber for different incident elliptically polarized light

同样都为 0.27 m.

分析可知，窄带旋转光纤圆起偏器的最小工作长度 L_{min} 与入射光的偏振态无关.

2.3　窄带旋转光纤圆起偏器的最小工作长度与旋转光纤参量的关系

鉴于 L_{min} 与注入光的偏振态无关，计算取 45°线偏振光注入，$\theta=\pi/4$，$\delta=0$. 当 $\varepsilon=7\ 500$ rad/m，$\Delta\beta$ 分别取 50 和 70 rad/m，功率传输曲线如图 8. ε 分别取 7 490、7 500、7 510 rad/m 时，L_{min} 与 $\Delta\beta$ 的关系曲线如图 9.

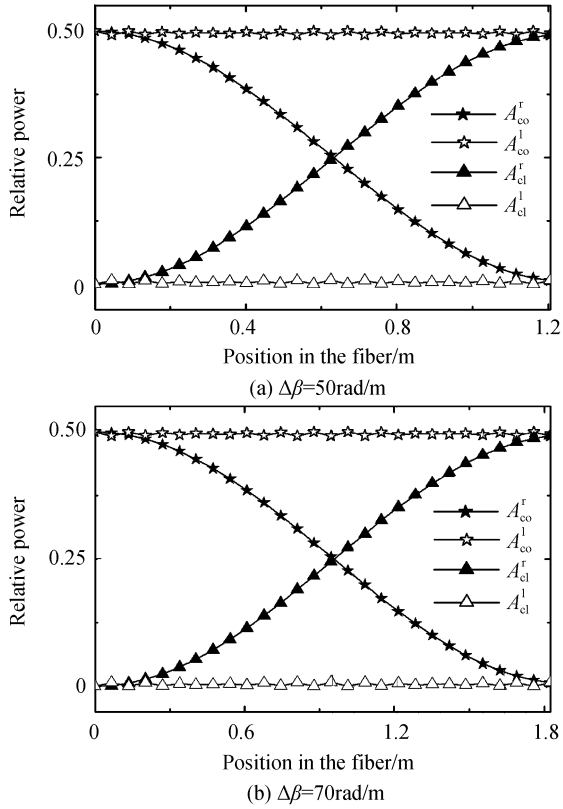


图 8　$\Delta\beta$ 不同时窄带旋转光纤圆起偏器的传输功率曲线

Fig. 8　The power transmission curves of narrowband spun fiber circular polarizer for different $\Delta\beta$

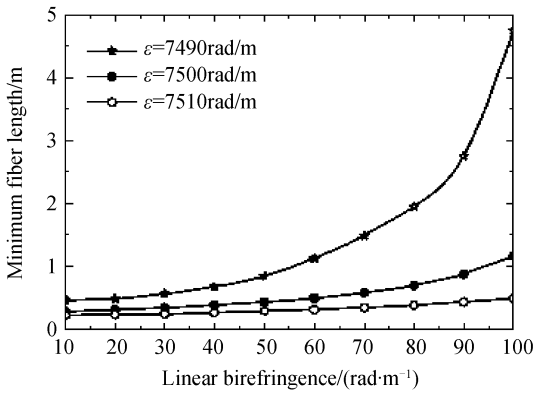


图 9　窄带圆起偏器最小长度与固有线双折射的关系曲线

Fig. 9　Relation of the minimum fiber length of narrowband spun fiber circular polarizer with intrinsic linear birefringence

从图 8 可以看出，$\Delta\beta$ 分别取 50 和 70 rad/m

时，L_{min}分别为1.24 m、1.82 m，给定ε，L_{min}随Δβ的增大而增大. 分析图9中三条曲线可知，ε相同时，L_{min}随着Δβ的增大而增大. Δβ相同时，ε越小，L_{min}越大.

当Δβ=10 rad/m，ε分别取7 510和7 520 rad/m，传输曲线如图10. Δβ分别取10，20，30 rad/m时，L_{min}与ε的关系曲线如图11.

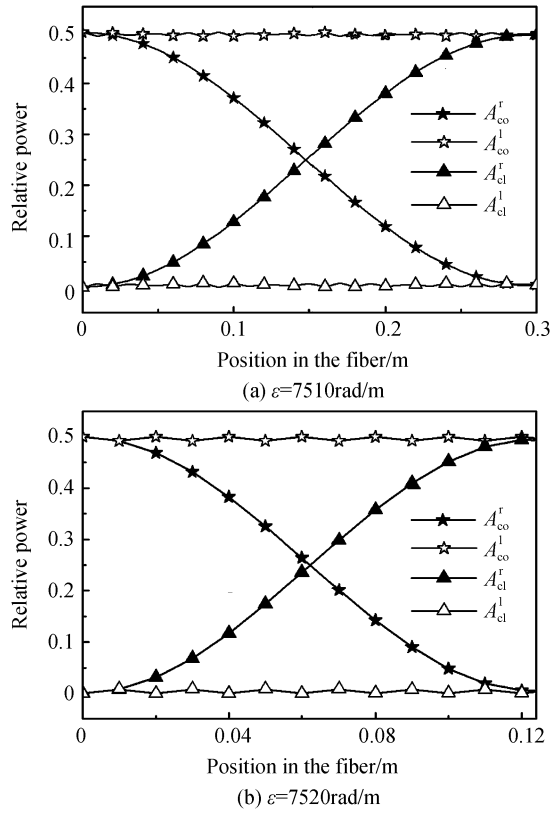


图10 不同ε时窄带旋转光纤圆起偏器的功率传输曲线

Fig. 10 The power transmission curves of narrowband spun fiber circular polarizer for different ε values

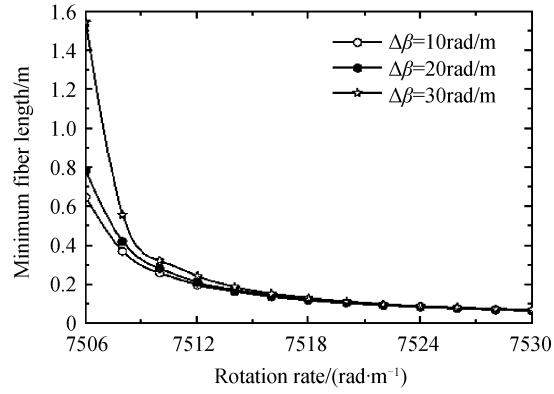


图11 窄带圆起偏器的最小光纤长度随旋转速率的变化

Fig. 11 Change of the minimum fiber length of narrowband spun fiber circular polarizer with spin rate

从图10可以看出，ε分别取7 510和7 520 rad/m时，L_{min}分别为0.30 m和0.124 m，给定Δβ，L_{min}随ε的增大而减小. 分析图11中三条曲线可知，L_{min}随ε的增大而减小，且Δβ越大，L_{min}减小的越快. 在ε较小时，Δβ对L_{min}的影响较明显，但当ε逐渐增大时，不同Δβ下的L_{min}逐渐趋于相等.

3 宽带旋转光纤圆起偏器的计算分析

含多个应力区的不旋转光纤的截面结构和折射率分布如图12. 纤芯区折射率N_0>应力区折射率N_2>远离纤芯的包层部分折射率N_3>靠近纤芯的包层部分折射率N_1. 各部分的平均折射率分别为$\bar{N}_0=1.472$，$\bar{N}_1=1.434$，$\bar{N}_2=1.457$，$\bar{N}_3=1.437$.

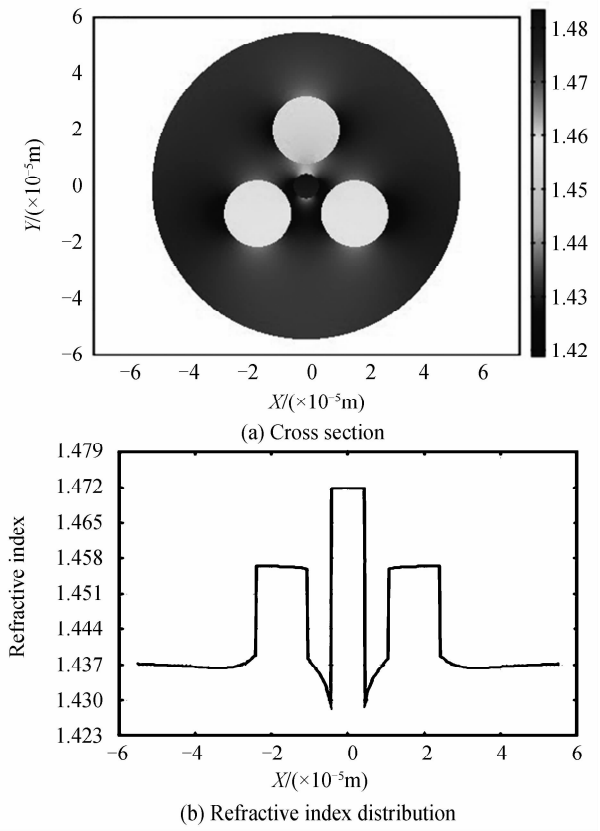


图12 不旋转光纤的截面结构和折射率分布

Fig. 12 Cross section and refractive index distribution of unspun fiber

多应力区旋转光纤的内部会形成螺旋形应力体结构. 当光纤旋转速率很大时，导致螺旋形应力体结构的螺距很小，这种螺旋形应力体结构将光纤包层分为等效折射率不同的三个区域，根据等效折射率的分布情况可以把旋转光纤等效为一个三包层光纤. 纤芯、第一内包层、第二内包层和外包层的等效折射率分别为$n_0(\varepsilon, \Delta\beta)$、$n_1(\varepsilon, \Delta\beta)$、$n_2(\varepsilon, \Delta\beta)$、$n_3(\varepsilon, \Delta\beta)$. 由式(9)、(11)和(13)可知，左旋和右旋圆偏振光在旋转光纤纤芯和各包层中的等效折射率为别为

$$\left.\begin{aligned} n_0(\varepsilon,\Delta\beta) &= \bar{N}_0 \mp (\Delta\beta + g)/k_0 \\ n_1(\varepsilon,\Delta\beta) &= \bar{N}_1 \pm \varepsilon/k_0 \\ n_2(\varepsilon,\Delta\beta) &= \bar{N}_2 \pm \varepsilon/k_0 \\ n_3(\varepsilon,\Delta\beta) &= \bar{N}_3 \pm \varepsilon/k_0 \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

式中 $k_0=2\pi/\lambda$，λ 为自由空间光波长，“－”号对应左旋圆偏振光的有效折射率，“＋”号对应右旋圆偏振光的有效折射率. 左旋和右旋圆偏振光的等效折射率不同，其基模截止波长 λ_c^l，λ_c^r 也不同[16]，在 λ_c^l，λ_c^r 之间存在一个单模单圆偏振窗口 $\Delta\lambda=\lambda_c^l-\lambda_c^r$，在这个窗口内，一个模式（例如：右旋圆偏振模）作为导模传输，另一个模式（左旋圆偏振模）作为高阶模损耗掉，从而在出射端获得右旋圆偏振光.

假定纤芯和包层中左旋和右旋圆偏振光的等效折射率分布如图 13. 纤芯半径 $r=4$ μm，r_1、r_2 分别

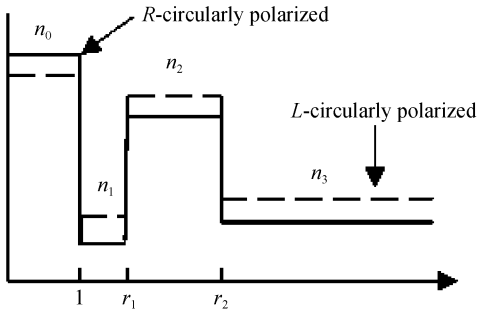


图 13　左旋和右旋圆偏振光的等效折射率分布

Fig. 13　Effective refractive index distribution for left-and right-handed circularly polarized light

为应力区内侧到纤芯中心、应力区外侧到纤芯中心相对于纤芯半径的归一化距离（无量纲），$D=r_2-r_1$ 为应力区的归一化宽度.

$$\Delta=\frac{n_0^2(\varepsilon,\Delta\beta)-n_3^2(\varepsilon,\Delta\beta)}{2n_3^2(\varepsilon,\Delta\beta)} \tag{19}$$

$$\Delta_i=\frac{n_i^2(\varepsilon,\Delta\beta)-n_3^2(\varepsilon,\Delta\beta)}{2n_3^2(\varepsilon,\Delta\beta)}\ (i=1,2) \tag{20}$$

$$d_i(\varepsilon,\Delta\beta)=\Delta_i/\Delta \tag{21}$$

式中，d_i 代表相对折射率深度. 模式截止时，代入相应左旋或者右旋圆偏振模的等效折射率，在弱导条件下求解标量波动方程，利用连续边界条件即可分别求得左旋圆偏振模和右旋圆偏振模的归一化截止频率 V_c^l、V_c^r，进而可以求得对应的截止波长[17]

$$\lambda_c^l=\frac{2\pi r n_3^l(\varepsilon,\Delta\beta)\sqrt{2\Delta^l}}{V_c^l} \tag{22}$$

$$\lambda_c^r=\frac{2\pi r n_3^r(\varepsilon,\Delta\beta)\sqrt{2\Delta^r}}{V_c^r} \tag{23}$$

令 $\Delta\beta=10$ rad/m，$\varepsilon=10^4$ rad/m，$r_1=1.8$，$r_2=4.8$，通过计算可知此时左旋和右旋圆偏振模归一化截止频率 V_c^l、V_c^r 分别为 1.312 和 1.282；截止波长 λ_c^l、λ_c^r 分别为 1445 nm 和 1645 nm，在 1550 nm 窗口附近可以得到约 200 nm 的工作带宽，调节旋转光纤参量可以实现其他工作波段的旋转光纤圆起偏器.

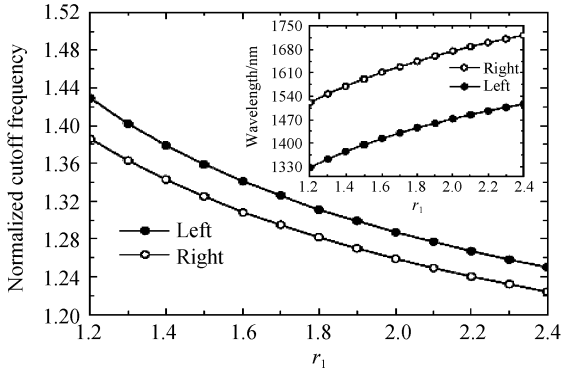
通过分析可知，V_c^l、V_c^r 是 r_1、D、$\Delta\beta$、ε 的函数，进而可以得到 λ_c^l、λ_c^r 与 r_1、D、$\Delta\beta$、ε 的关系曲线，如图 14.

图 14(a) 中 V_c^l、V_c^r 随应力区内侧边缘到纤芯中心的距离 r_1 的增大而减小，$V_c^l-V_c^r$ 基本保持不变，旋转光纤圆起偏器的工作带宽 $\Delta\lambda$ 也基本不变，但是中心工作波长向长波方向移动.

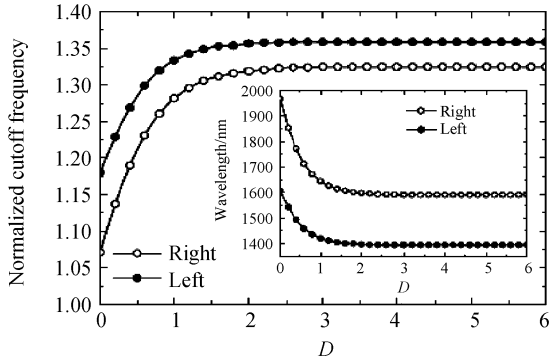
图 14(b) 中 V_c^l、V_c^r 随应力区宽度的增大而增大，逐渐趋于不变，$V_c^l-V_c^r$ 的变化趋势与之相同，$\Delta\lambda$ 先减小然后趋于不变.

图 14(c) 中光纤旋转速率逐渐增大，V_c^l 随之增大，V_c^r 随之减小，$V_c^l-V_c^r$ 逐渐增大，$\Delta\lambda$ 也逐渐增大，但中心工作波长保持不变.

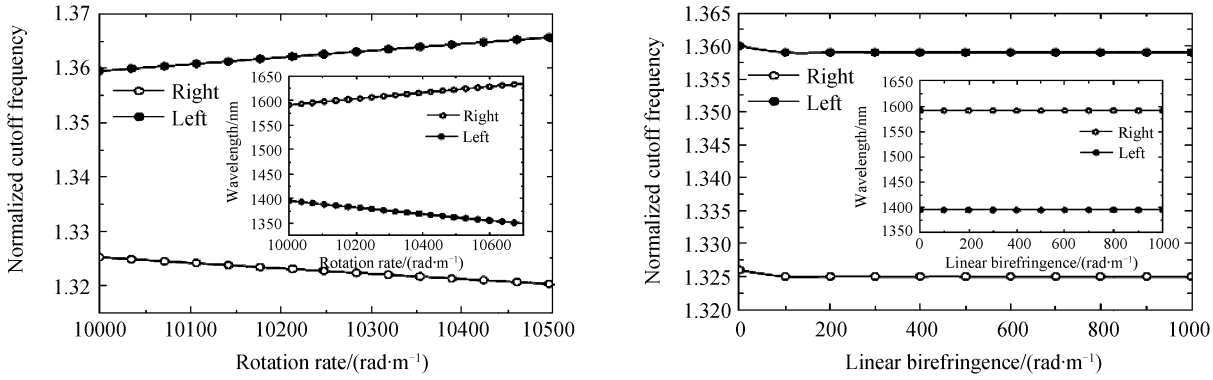
图 14(d) 中固有线双折射相对于旋转速率非常小，$\Delta\beta$ 逐渐增大时，V_c^l、V_c^r 基本不发生变化，$\Delta\lambda$ 也基本不变.



(a) $\Delta\beta$=10rad/m, ε=10^{4}rad/m, D=4



(b) $\Delta\beta$=10rad/m, ε=10^{4}rad/m, r_1=1.5



(c) $\Delta\beta$=10rad/m, r_1=1.5, r_2=5.5 (d) ε=10^4rad/m, r_1=1.5, r_2=5.5

图 14 归一化截止频率与各参量的关系曲线

Fig. 14 Relation of the normalized cutoff frequency with different parameters

基于以上分析可知,影响高速旋转、低线双折射光纤宽带圆起偏器工作带宽的主要因素是光纤旋转速率,影响中心工作波长的主要因素是应力区到纤芯的距离.

4 结论

高速旋转单模低线双折射光纤可形成光纤圆起偏器,根据带宽的不同可划分为窄带和宽带两类旋转光纤圆起偏器.窄带旋转光纤圆起偏器,纤芯中传输的左旋和右旋圆偏振基模中的一个模式与包层模发生耦合而损耗掉,另外一个模式可以无损耗地通过.宽带旋转光纤圆起偏器,因左旋和右旋圆偏振光的截止波长不同可形成单圆偏振窗口,从而使其中一个圆偏振模损耗掉,另一个圆偏振模可以无损耗地通过.由于任意偏振态的光都可以分解为相互正交的左旋和右旋圆偏振光,所以在一定的光纤长度和带宽内可以实现左旋或右旋圆起偏功能.分析表明,窄带旋转光纤圆起偏器的最小工作长度与注入光的偏振态无关,而与光纤固有线双折射和旋转速率有关.改变光纤旋转速率可调节宽带圆起偏器的工作带宽;改变应力区到纤芯的距离可以改变宽带圆起偏器的中心工作波长.在实际研制过程中,可根据需求适当调整这些参量,研制出在特定波段具有圆起偏功能的旋转光纤光子器件.

参考文献

[1] HOSAKA T, OKAMOTO K, EDAHIRO T. Fiber circular polarier[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(23): 3850-3858.

[2] HUANG Hung-chia. Fiber-optic analogs of bulk-optic wave plates[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(18): 4241-4258.

[3] ZHU Xiu-shan, Ravi Jain. Detailed analysis of evolution of the state of polarization in all-fiber polarization transformers[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(22):10261-10277.

[4] ROSE A H, FEAT N, ETZEL S M. Wavelength and temperature performance of polarization transforming fiber [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(34): 6897-6904.

[5] SHI Zhi-dong, JI Min-ning, BAO Huan-huan. Polarization state evolution in fibre polarization transformer influenced by phase difference[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(7): 1967-1970.

[6] KOPP V I, GENACK A Z. Double-helix chiral fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(20): 1876-1878.

[7] KOPP V I, CHURIKOV V M, SINGER J, *et al*. Chiral fiber gratings[J]. *Science*, 2004, **305**(5680): 74-75.

[8] KOOP V I, CHURIKOV V M, ZHANG G, *et al*. Single-and doble-helix chiral fiber sensors[J]. *JOSA B*, 2007, **24**(10): 48-52.

[9] SHYETS G, TRENDAFILOV S, KOPP V I *et al*. Polarization properties of chiral fiber gratings[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, **11**(7): 74007-74016.

[10] 苏觉,李成,洪雷,等. 光纤圆偏振器:中国,200910152016.3[P]. 2010-01-13.

[11] QIAN Jing-ren, WANG Xu-xu. Coupled-mode theory for spun multi-lobes stress region fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 67-69.
钱景仁,王许旭. 多叶应力区扭转光纤的耦合模理论[J]. 光学学报,2007, **27**(3): 67-69.

[12] JI Min-ning, SHI Zhi-dong. Beat length and SOP maintaining capability of spun optical fibers[J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(5): 67-69.
季敏宁,石志东. 旋转光纤中的拍长与偏振态保持能力[J]. 激光杂志, 2003, **24**(5): 67-69.

[13] ARGYROS A, PLA J, LADOUCEUR F, *et al*. Circular and elliptical birefringence in spun microstructrred optical fibers [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(18): 15983-15990.

[14] HUANG Hung-chia. Practical circular polarization maintaining optical fiber[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(27): 6968-6975.

[15] QIAN Jing-ren, HUANG Wei-ping. LP modes and ideal modes on optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, **4**(6): 626-630.

[16] JI Min-ning. Boron-doped content and band-width of W-tunneling optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(1): 52-56.
季敏宁. W-型单模单偏振光纤中的硼掺杂和带宽[J]. 中国激光, 2002, **29**(1): 52-56.

[17] ZHANG Xiao-ping, TIAN Xiang-qing. Analysis of wavegude dispersion characteristics of WⅠ and WⅡ type triple cladding single mode fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 581-586.
张晓萍,田祥庆. 三包层WⅠ和WⅡ型单模光纤波导色散特性的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(5): 581-586.

Characteristics Analysis of Spun Fiber Circular Polarizer

WU Ming-hua, MENG Yi-chao
(*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200072, *China*)

Abstract: Characteristics of narrowband and wideband spun fiber circular polarizer were numerically analyzed based on spun fiber coupled-mode theory. Influence on the minimum operation length of the narrowband circular polarizer by such factors as polarization state of the incident light, intrinsic linear birefringence and spin rate of the spun fiber were studied. By use of multi-cladding fiber analysis method, influence on the operation bandwidth of the wideband circular polarizer by the various parameters of the spun fiber was analyzed also. The results show that the minimum operation length of narrowband circular polarizer is dependent on the inherent linear birefringence and the spin rate of the fiber, and is independent on the polarization state of the incident light. Changing the spin rate can adjust the bandwidth of the wideband circular polarizer, and changing the distance between the fiber core and the stress zone can lead the central wavelength of it to change accordingly.

Key words: Fiber optics; Spun fiber; Coupled-mode theory; Circular polarizer; Numerical analysis