

低双折射光纤中拉曼增益对光偏振态的影响

王美洁 贾维国 张思远 门克内木乐 杨军 张俊萍

Effect of Raman gain on the state of polarization evolution in a low-birefringence fiber

Wang Mei-Jie Jia Wei-Guo Zhang Si-Yuan Menke Nei-Mu-Le Yang Jun Zhang Jun-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034212 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氘含量对 DKDP 晶体横向受激拉曼散射增益系数的影响

Influence of deuteration degree on the transverse-stimulated Raman scattering gain coefficient of DKDP crystal

物理学报.2015, 64(3): 034213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034213>

拉曼增益对双折射光纤中孤子传输特性的影响

Effect of Raman gain on the characteristic of soliton transmission in birefringence optical fiber

物理学报.2014, 63(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094208>

976 nm 激光抽运二氧化硅微球级联拉曼散射激光的研究

Study of cascaded raman scattering laser in silica microsphere pumped by 976 nm laser

物理学报.2013, 62(22): 224207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224207>

拉曼增益对孤子传输特性的影响

Effect of Ramam gain on the characteristic of soliton propagation

物理学报.2013, 62(10): 104212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104212>

基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪

Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bi-directional Raman amplification

物理学报.2013, 62(4): 044212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044212>

低双折射光纤中拉曼增益对光偏振态的影响*

王美洁 贾维国[†] 张思远 门克内木乐 杨军 张俊萍

(内蒙古大学物理科学与技术学院, 呼和浩特 010021)

(2014年6月20日收到; 2014年7月14日收到修改稿)

利用包含拉曼增益的耦合非线性薛定谔方程, 导出了斯托克斯参量表示的含拉曼增益的杜芬方程, 通过椭圆积分求出了杜芬方程的解析解, 重点分析了光波在低双折射光纤中传播时, 拉曼增益对其偏振态演化的影响结果表明当输入功率与运动常量满足一定关系时, 拉曼增益改变了光波传输时其偏振态演化周期。

关键词: 拉曼增益, 低双折射, 斯托克斯参量, 偏振态

PACS: 42.65.Dr, 42.25.LC, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.64.034212

1 引言

随着光纤通信、光纤传感器和光纤偏振控制器件等技术的不断发展, 人们越来越关注光纤中的偏振特性^[1]。理想的单模光纤具有轴对称性, 几何形状为理想圆, 折射率分布均匀等特点, 可以同时使两个正交的偏振模式以相同的速度在光纤中向前传播, 因而在传播中保持偏振态不变。但实际上, 由于光纤制作达不到理想的要求且受外界环境的影响, 两正交偏振模式在传播过程中发生耦合, 输入的线偏振光经光纤传输一段距离后便会变成椭圆偏振光, 并随传输距离周期性或者非周期性的变化, 这种偏振的不稳定性对于偏振保持要求高的器件来说是非常有害的^[2,3]。

目前, 很多文献中研究了光纤中如何有效的提升偏振控制^[4,5]和偏振模色散的研究^[6], 但是, 很少研究拉曼增益对低双折射光纤中偏振态特性的影响。而拉曼效应是光纤中的固有特性之一, 当入射光脉冲的功率达到一定阈值时, 就会发生光子与光学声子间的相互作用产生拉曼效应, 从而产生拉曼增益^[7], 此时光纤中光脉冲的拉曼增益也变得不可忽略。因此, 当输入功率一定时, 研究低双折射光纤中含拉曼增益的光偏振态特性具有重要的意

义。本文从含有拉曼增益的非线性耦合波薛定谔方程出发, 引进可以全面描述光束偏振态的斯托克斯参量, 通过斯托克斯参量的杜芬方程以及利用椭圆积分^[8]求出解析解, 分析了光纤中拉曼增益对光偏振态的影响。

2 理论基础

准连续的情况下, 忽略光纤损耗, 用线偏振光表示含拉曼效应的耦合非线性薛定谔方程为^[9]

$$\frac{\partial \bar{A}_x}{\partial z} = \frac{i\Delta\beta}{2} \bar{A}_x + i[(Q_1 + 2Q_2)|\bar{A}_x|^2 + 2Q_1|\bar{A}_y|^2] \bar{A}_x + i(2Q_2 - Q_1) \bar{A}_x^* \bar{A}_y^2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{A}_y}{\partial z} = -\frac{i\Delta\beta}{2} \bar{A}_y + i[(Q_1 + 2Q_2)|\bar{A}_y|^2 + 2Q_1|\bar{A}_x|^2] \bar{A}_y + i(2Q_2 - Q_1) \bar{A}_y^* \bar{A}_x^2, \quad (2)$$

其中,

$$Q_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} r - \frac{ig_0''(\Omega)}{8} \right),$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} r - \frac{ig_0''(\Omega)}{8} \right),$$

\bar{A}_x 和 \bar{A}_y 是沿 x 分量和 y 分量的慢变振幅, \bar{A}_x^* 和 \bar{A}_y^* 分别是 \bar{A}_x 和 \bar{A}_y 的共轭, γ 是非线性系数,

* 国家自然科学基金(批准号: 61167004)和内蒙古自然科学基金(批准号: 2014MS0104)资助的课题。

[†] 通信作者。E-mail: jwg1960@163.com

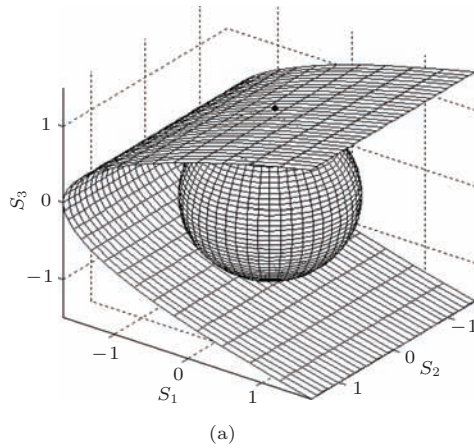
$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y|$ 是沿 x 方向和 y 方向的传输常数差, $g_0^{//}(\Omega)$ 是平行拉曼增益, Ω 是抽运波与斯托克斯波或反斯托克斯波的频率差^[10,11], 对于斯托克斯波 $\Omega = \omega_0 - \omega_s > 0$, 而反斯托克斯波 $\Omega = \omega_0 - \omega_a < 0$.

为分析偏振态演化, 引入可全面描述光偏振态的四个斯托克斯参量并定义为

$$\begin{aligned} S_0 &= |\bar{A}_x|^2 + |\bar{A}_y|^2, \\ S_1 &= |\bar{A}_x|^2 - |\bar{A}_y|^2, \\ S_2 &= \bar{A}_x \bar{A}_y^* + \bar{A}_x^* \bar{A}_y, \\ S_3 &= i(\bar{A}_x^* \bar{A}_y - \bar{A}_x \bar{A}_y^*). \end{aligned} \quad (3)$$

用(3)式表示(1), (2)式, 得到斯托克斯参量在沿光纤传输方向的演化方程表示为

$$\begin{aligned} \frac{dS_0}{dz} &= 0, \\ \frac{dS_1}{dz} &= 2\left(\frac{2\gamma}{3} - \frac{ig_0^{//}(\Omega)}{16}\right)S_2S_3, \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \frac{dS_2}{dz} &= -(\Delta\beta)S_3 - 2\left(\frac{2\gamma}{3} - \frac{ig_0^{//}(\Omega)}{16}\right)S_1S_3, \\ \frac{dS_3}{dz} &= (\Delta\beta)S_2. \end{aligned} \quad (4)$$

通过(4)式很容易得到两个恒等式

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = S_0^2 = P^2, \quad (5a)$$

$$\frac{2\gamma}{3} - d\frac{ig_0^{//}(\Omega)}{16} \frac{S_3^2 - S_1}{\Delta\beta} = \Gamma. \quad (5b)$$

(5a)式表示以 S_1, S_2, S_3 为坐标的庞加莱球, (5b)式表示以顶点坐标为 $(\Gamma, 0, 0)$ 且平行于 S_2 轴的抛物柱面; 抛物柱面与庞加莱球相交产生的平滑曲线表征了光波在光纤中传输时的偏振演化的轨迹. 其中 Γ 是与哈密顿量相关的运动常量^[12,13], 其数值大小直接影响了抛物柱面与庞加莱球相交产生的曲线类型; P 表示入射的总功率.

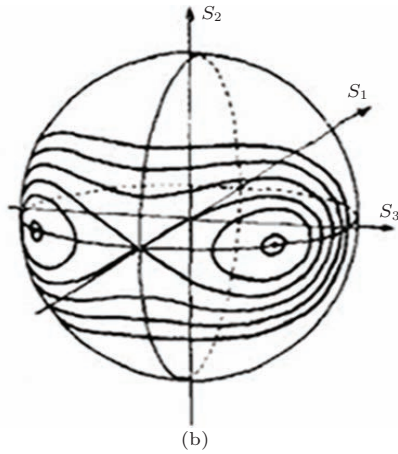


图1 (a) 抛物柱面与庞加莱球相交模型; (b) 抛物柱面与庞加莱球相交产生的闭合曲线

建立以 S_1, S_2, S_3 为轴的坐标系, 图1(a)是球面与抛物柱面相交的模型, (b)图是当 P 和 Γ 满足不同关系时在庞加莱球上产生的交线类型. 为进一步清晰的理解图1(b)中的曲线, 把演化曲线投影到 S_2 - S_3 平面得到图2, 其中1—3曲线分别代表 $P > \Gamma, P = \Gamma, P < \Gamma$ 的情形. 从图中闭合曲线2可以看出偏振态演化在点 O 处相交, 若假设该曲线方向为顺时针, O 点衍化则呈现两种趋势, 出现分歧现象, 所以当初始条件满足输入端偏振态在 O 点处时, 偏振态趋于不稳定, 而1, 3曲线为偏振态正常衍化. 本文将拉曼增益对1, 3曲线所表示的偏振

态衍化进行讨论, 以找出拉曼增益对偏振态正常衍化的规律.

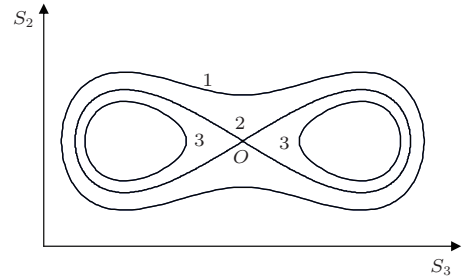


图2 演化曲线在 S_2 - S_3 平面投影, 其中1—3曲线分别代表 $P > \Gamma, P = \Gamma, P < \Gamma$ 的情形

3 数值模拟与分析

考虑斯托克斯参量的运动时, 由(4)式微分并结合(5)式得到

$$\ddot{S}_3 + \alpha S_3 + \beta S_3^3 = 0, \quad (6)$$

$$\ddot{S}_1 + aS_1^2 + bS_1 + c = 0, \quad (7)$$

其中

$$\alpha = \Delta\beta^2 - \Delta\beta \left(\frac{4}{3}\gamma - \frac{ig_0''(\Omega)}{8} \right) \Gamma,$$

$$\beta = 2 \left(\frac{2}{3}\gamma - \frac{ig_0''(\Omega)}{16} \right)^2,$$

$$a = 6 \left(\frac{2\gamma}{3} - \frac{ig_0''(\Omega)}{16} \right) \Delta\beta,$$

$$b = 4 \left(\frac{2\gamma}{3} - \frac{ig_0''(\Omega)}{16} \right) \Delta\beta(\Delta\beta + \Gamma),$$

$$c = 4\Delta\beta^2\Gamma - 2 \left(\frac{2\gamma}{3} - \frac{ig_0''(\Omega)}{16} \right) \Delta\beta P^2.$$

(6)和(7)式是非线性振动理论中研究的杜芬方程, 该方程用来描述斯托克斯参量沿光纤传输方向上的一维运动情况.

通过椭圆积分得到(6), (7)式的解析解为^[14]

$$S_3(z) = \begin{cases} \text{Acn} \left[z (\alpha + \beta A^2)^{1/2}, p \right], \\ p^2 = \frac{\beta A^2}{2(\alpha + \beta A^2)}, \quad P > \Gamma, \\ \text{Adn} \left[z A \left(\frac{\alpha}{2} \right)^{1/2}, q \right], \\ q^2 = 2 \left[1 - \frac{\alpha}{(\beta A^2)} \right], \quad P < \Gamma, \end{cases} \quad (8)$$

$$S_1(z) = \begin{cases} \text{Acn}^2 \left[z \left(\frac{4aA + 3b}{12} \right)^{1/2}, m \right], \\ m^2 = \frac{2aA}{4aA + 3b}, \quad P > \Gamma, \\ \text{Adn}^2 \left[z \left(\frac{aA}{6} \right)^{1/2}, n \right], \\ n^2 = \frac{4c + bA}{2c + bA}, \quad P < \Gamma, \end{cases} \quad (9)$$

这里 $\text{cn}(u, k)$ 和 $\text{dn}(u, k)$ 表示雅可比椭圆函数, A 是依赖于初始条件的常量^[15]. S_2 的解析解可通过 $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = P^2$ 确定. 根据解析解可以得到斯托克斯参量随传输距离 z 的变化曲线如图3至图5所示. 本文中运动常量 Γ 取 100 W, 传输距离 z

取 25 m, 非线性系数 γ 取 $0.15 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 传播常数差 $\Delta\beta$ 取 1.256 m^{-1} , 存在拉曼效应时拉曼增益取 $0.8 \times 10^{-13} \text{ m/W}$.

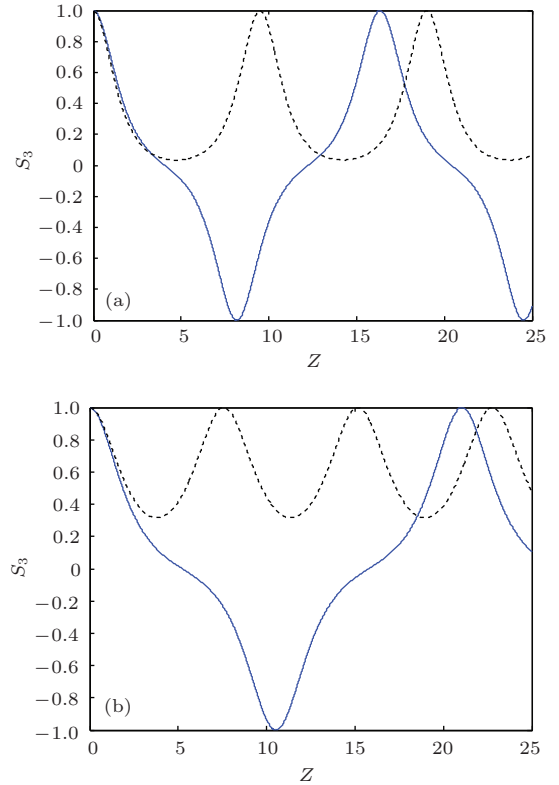


图3 斯托克斯参量 S_3 随光纤传输距离 z 的变化曲线 (实线表示 $P > \Gamma$, 虚线表示 $P < \Gamma$) (a) 无拉曼增益; (b) 考虑拉曼增益

图3中实线和虚线分别表示输入功率 P 取 120W 和 80W 时, 斯托克斯参量 S_3 在随光纤传输方向上的变化曲线; 图3(a) 不考虑拉曼增益, (b) 考虑拉曼增益. 由图中可以看出: 无论输入功率 P 与运动常量 Γ 满足怎样条件, S_3 随着光纤传输距离的增加, 均成周期性演化; 入射光靠近快轴 S_3 偏振时, 随着输入功率的增加, 周期性演化变大, 偏振演化的拍长变大. 通过比较图3(a)和(b): 当输入功率满足 $P < \Gamma$ 时, 拉曼增益使得 S_3 的演化周期变小, 峰值变小, 对应庞加莱球上演化轨迹变小; 当输入功率满足 $P > \Gamma$, 拉曼增益使斯托克斯参量 S_3 演化周期变大.

图4中实线和虚线分别表示输入功率 P 取 120W 和 80W 时, 即得到 $P > \Gamma$ 和 $P < \Gamma$ 斯托克斯参量 S_1 随光纤传输距离的变化曲线. 由图4中可以看出斯托克斯参量 S_1 在光纤传播方向上随传输距离成周期性运动, 运动轨迹成单峰值运动. 通过比较图4(a)和(b): 当输入功率满足 $P < \Gamma$ 时,

拉曼增益使得 S_1 的演化周期变小, 峰值变小; 光纤中描述双折射现象的重要参数 B 与偏振拍长 L_B 之间满足 $L_B = 2\pi/\Delta\beta = \lambda/B$ 的关系, 即双折射越强, 偏振态变化一个周期所需要的长度 L_B 越短, 因此, 当存在拉曼增益时, 光纤中双折射参数 B 变大. 当输入功率满足 $P > \Gamma$, 拉曼增益使斯托克斯参量 S_1 演化周期变大, 光纤中双折射参数 B 变小, 由于低双折射光纤的特点是两正交偏振态间的 $\Delta\beta$ 尽量小, 使 B 达到极低的水平, 这种光纤随外界变化灵敏, 构成一类光纤传感器的基础, 因此, 当输入功率满足 $P > \Gamma$ 且存在拉曼增益的光纤有益于上述传感器的应用.

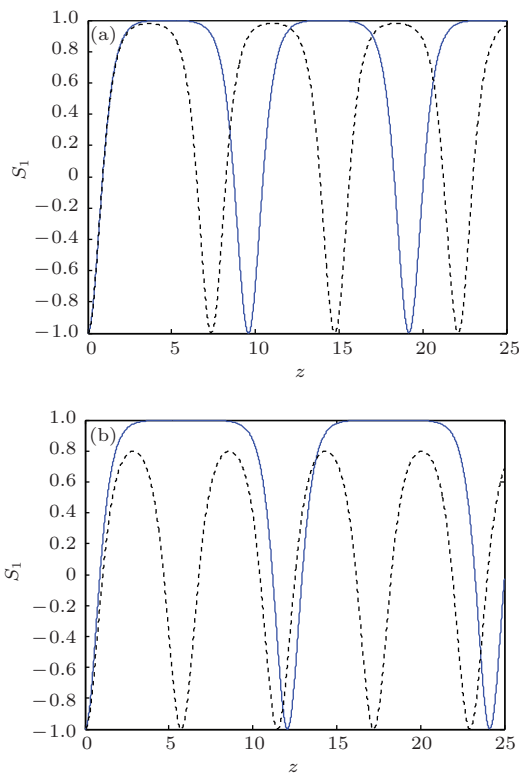


图4 斯托克斯参量 S_1 随光纤传输距离 z 的变化曲线 (实线表示 $P > \Gamma$, 虚线表示 $P < \Gamma$) (a) 无拉曼增益; (b) 考虑拉曼增益

同样图5中实线和虚线分别表示输入功率 P 取 120 W 和 80 W 时, 即得到 $P > \Gamma$ 和 $P < \Gamma$ 斯托克斯参量 S_2 随光纤传输距离的变化曲线. 从图5中可以看出, 当 $P > \Gamma$ 时, S_2 运动周期成四峰, 对称的分布在正负半轴, 当 $P < \Gamma$ 时, S_2 运动周期值成双峰, 同样对称的分布在正负半轴. 通过比较图5(a)和(b), 当存在拉曼增益时且 $P < \Gamma$ 时, 斯托克斯参量 S_2 的演化周期变小, 其峰值变小, 光纤中双折射参数 B 变大; 当存在拉曼增益时且 $P > \Gamma$

时, 斯托克斯矢量 S_2 演化的周期变大, 对应庞加莱球上的偏振态演化的范围变大, 光纤中双折射参数 B 变小.

由图3至图5所示, 随着光纤传输距离的增加, S_1, S_2, S_3 的运动成周期性演化, 这与庞加莱球上的演化轨迹相对应. S_1, S_2, S_3 运动周期在分别 $P > \Gamma, P < \Gamma$ 情况下有明显不同, $P > \Gamma$ 时各分量周期较 $P < \Gamma$ 情况要长, 存在拉曼增益时, 将导致周期变大. 这表明在 $P = \Gamma$ 这一边界线处两端偏振态演化有着明显不同的周期, 偏振态演化将随着输入功率到达某一阈值时明显变化, 最终导致输出偏振态剧烈变化. 因此, 当存在拉曼增益时控制好初始输入功率, 可以提高像光开关、光调制放大器和偏振开关等器件的性能.

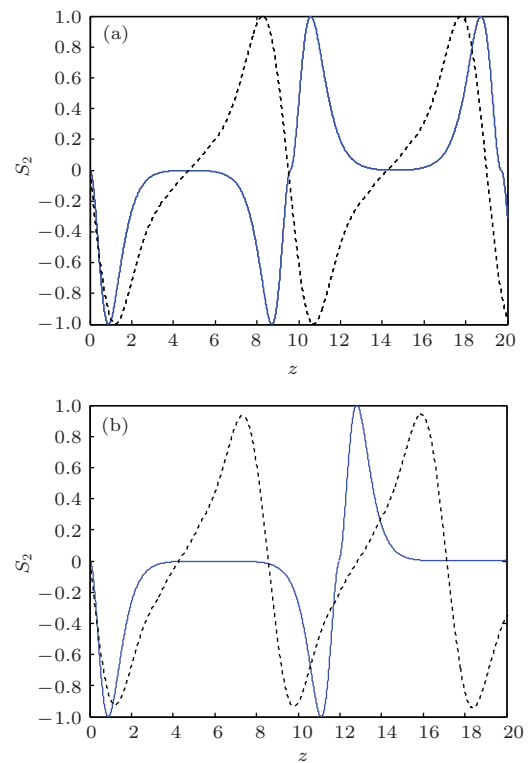


图5 斯托克斯参量 S_2 随光纤传输距离 z 的变化曲线 (实线表示 $P > \Gamma$, 虚线表示 $P < \Gamma$) (a) 无拉曼增益; (b) 考虑拉曼增益

4 结 论

光脉冲在低双折射光纤中传播时, 由于外界因素和光纤内部因素造成单模光纤发生模式双折射, 使光波在传输过程中偏振态发生变化. 本文通过当输入功率满足一定阈值时, 产生拉曼增益, 从含拉曼增益的光纤薛定谔方程出发, 引入能够表征光波偏振态的斯托克斯参量, 通过斯托克参量的变

化曲线研究拉曼增益对光纤中偏振态的影响. 结果表明: 当输入功率满足 $P < \Gamma$ 时, 拉曼增益使斯托克斯参量 S_1, S_2, S_3 运动周期变小, 对应于庞加莱球上产生的曲线范围变小, 光的偏振态演化范围变小, 光纤中双折射参数 B 变大; 当输入功率满足 $P > \Gamma$ 时, 拉曼增益使斯托克斯参量 S_1, S_2, S_3 运动周期变大, 对应庞加莱球上抛物柱面相交出的曲线范围变大, 光传播过程中的演化轨迹变大, 光纤中双折射参数 B 变小. 可见, 控制好存在拉曼增益的低双折射光纤的初始输入功率, 可以提高像光纤传感器、光调制放大器和偏振开关等器件的性能.

参考文献

- [1] Yan F P, Li Y F, Wang L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5735 (in Chinese) [延凤平, 李一凡, 王琳 2008 物理学报 **57** 5735]
- [2] Qin Z Y, Cheng Z G, Zhang Z P 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 659 (in Chinese) [覃兆宇, 程兆谷, 张志平 2007 光学学报 **27** 659]
- [3] Fu S N, Wu C Q, Liu H T 2003 *Chin. Phys.* **12** 1423
- [4] Li S, Ma H Q, Wu L A 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084214 (in Chinese) [李申, 马海强, 吴令安 2013 物理学报 **62** 084214]
- [5] Zuo L, Yang A Y, Zhou D W, Sun Y N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054211 (in Chinese) [左林, 杨爱英, 周大伟, 孙雨南 2012 物理学报 **61** 054211]
- [6] Qin J X, Xi X L, Zhang X G, Tian F 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114201
- [7] Wang X Y, Jia W G, Yin J Q 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 06060011 (in Chinese) [王旭颖, 贾维国, 尹健全 2011 光学学报 **31** 06060011]
- [8] Daino B, Gregori G, Wabnitz S 1985 *J. Appl. Phys.* **58** 4512
- [9] Han F, Jia W G, Chai H Y 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 07290021 (in Chinese) [韩风, 贾维国, 柴宏宇 2013 光学学报 **33** 07290021]
- [10] Trillo S, Wabnitz S 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 1061
- [11] Chai H Y, Jia W G, Han F 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 12190011 (in Chinese) [柴宏宇, 贾维国, 韩风 2013 光学学报 **33** 12190011]
- [12] Akhmediev N, Soto-Crespo J M 1994 *Phys. Rev. E* **49** 5742
- [13] Daino B, Gregori G, Wabnitz S 1985 *J. Appl. Phys.* **58** 4512
- [14] Liu S S, Liu S K 2012 *Nonlinear Equations in Physics* (2nd Ed.) (Beijing: Peking University Press) p58 (in Chinese) [刘式适, 刘式达 2012 物理学中的非线性方程 (第二版) (北京: 北京大学出版社) 第58页]
- [15] Gregoi G, Wabnitz S 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 600

Effect of Raman gain on the state of polarization evolution in a low-birefringence fiber*

Wang Mei-Jie Jia Wei-Guo[†] Zhang Si-Yuan Menke Nei-Mu-Le
Yang Jun Zhang Jun-Ping

(School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

(Received 20 June 2014; revised manuscript received 14 July 2014)

Abstract

Using the coupled nonlinear Schrödinger (CNLS) equation containing the Raman gain, the Duffing equation with Raman gain is derived, which is represented by the Stokes parameters, and then the elliptic integrals are used to compute the analytical solutions. This article focuses on the analysis of the Raman gain influence on the evolution of the polarization state when the optical waves are propagating in a low-birefringence fiber. Results show that the transmission cycle of the polarization evolution state can be changed due to Raman gain, if the input power and motion constants have a certain relationship.

Keywords: Raman gain, low-birefringence, Stokes parameters, state of polarization

PACS: 42.65.Dr, 42.25.LC, 42.25.Ja

DOI: [10.7498/aps.64.034212](https://doi.org/10.7498/aps.64.034212)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61167004), and the Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China (Grant No. 2014MS0104).

[†] Corresponding author. E-mail: jwg1960@163.com