

非线性光纤环形镜的脉冲透过特性研究*

谈 斌† 李智勇 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

(2003 年 10 月 17 日收到, 2003 年 12 月 14 日收到修改稿)

研究了光纤反常色散区非线性环形镜(NOLM)的脉冲透过特性, 得到 NOLM 周期性透过率函数第一极大值处透过率、压缩比和对应的孤子阶数与环长之间的函数关系图. 通过比较长环和短环 NOLM 对无啁啾、啁啾脉冲的透过率和压缩比特性, 得出了长环有利于脉冲整形而短环有利于脉冲压缩的结论.

关键词: 非线性环形镜, 透过率, 压缩比, 孤子阶数

PACC: 4280A, 4280M, 4265S

1. 引言

基于光纤的非线性环形镜(NOLM)作为一种非线性光开关器件, 其开关特性已从理论和实验上作了系统研究^[1-3]. 从透过率角度来看, NOLM 对于连续和准连续波的透过率函数为信号功率的余弦函数, 可以得到很好的开关特性; 而对脉冲信号, 由于脉冲各部分功率不同, 相应的非线性相移不同, 并且光纤色散会改变脉冲形状, 所以其透过率函数需要通过数值求解非线性薛定谔方程(NLSE)得出. 尽管已有研究对脉冲在 NOLM 中的透过率特性进行了讨论^[2], 但其采用的近似模型是针对孤子开关这一假设的, 与实际情况并不完全相符. 另一方面, 这种针对脉冲的讨论都是在环长为几个孤子周期的条件下进行的^[1-3], 目的是为了考察脉冲的透过率问题, 对小于一个孤子周期的情况并没有作讨论. NOLM 作为一种响应速度在飞秒量级的快可饱和吸收体, 在脉冲整形、脉冲净化和脉冲压缩方面也有很大的应用价值, 对此也有研究对不同功率水平条件下脉冲透过形状进行讨论^[4], 但其结论是针对正常色散情况的, 而且没有给出压缩比关系. 另外, 这些研究中对 NOLM 的讨论采用的都是实际单位, 而非孤子单位, 所以从中不易得出普遍关系. 为此, 本文从归一化的 NLSE 出发, 研究了反常色散区 NOLM 的脉冲透过特性, 得到了脉冲情况下 NOLM 的周期性透

率的第一极大值、第一极大值处的压缩比和相应的孤子阶数与环长的关系, 分别针对长环和短环两种情况从透过率和压缩比特性两方面进行了比较, 同时也讨论了初始啁啾对透过特性的影响. 数值计算结果表明 NOLM 在长环和短环情况下各有特点, 长环有利于脉冲整形而短环有利于脉冲压缩, 这对指导 NOLM 参数选择方面具有重要参考意义.

2. NOLM 模型

目前的 NOLM 包括普通 NOLM, 非线性放大环形镜(NALM)或色散非对称 NOLM(DI-NOLM). 普通 NOLM 开关阈值比较高, 从连续或者准连续波角度来说不如 NALM 或者 DI-NOLM 有优势, 但对于短脉冲来说, 峰值功率可以很容易超过阈值. 同时这种 NOLM 结构简单, 只需利用非 3dB 的 2×2 耦合器构建 Ω 环即可, 具有无源的优点. 因此仍然具有很重要的应用价值, 也是以下所讨论的对象.

关于 NOLM 的基本原理和对连续波的透过特性已经有详细论述^[1], 不再另作讨论. 下面直接给出本文计算中用到的归一化 NLSE^[5]:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - \frac{i}{2} \Gamma u - |u|^2 u, \quad (1)$$

其中 u 是归一化复振幅, ξ 是归一化距离, τ 是归一化时间, Γ 是归一化损耗. 讨论中所假设的入射脉冲是双曲正割形, 即

* 国家自然科学基金(批准号 69877012)资助的课题.

† E-mail: tanmc@263.net, 电话: 022-27402420.

$$u(0, \tau) = N \operatorname{sech}(\tau), \quad (2)$$

其中 N 表示孤子阶数.

我们注意到短脉冲情况下,信号在 NOLM 传输时脉冲内拉曼频移会造成脉冲分裂和群速度(GVD)失配现象,从而使透过特性受到影响^[3],这时为了得到准确的结果必须在(1)式中加上拉曼项.但考虑到:1)假定实际讨论的入射脉冲是皮秒脉冲(脉宽 $> 1\text{ps}$);2)对于长环,真正要讨论的 N 值范围不大,拉曼效应影响较小;3)对于短环,一方面拉曼频移量与距离成正比,距离短时影响不大,另一方面即使在这种情况下感兴趣的仍然是 N 较小的情况,也就是只延伸到后面提到的透过率的第一极大值附近;4)所选取的耦合器($R:1-R$, R 是 NOLM 中 3dB 耦合器直通臂的透过率)中 $R \geq 40\%$,反向传播的两信号间的能量差异比文献[3]中的要小,所以由拉曼散射引起的频谱、群速度差异不大.因此我们的讨论中忽略了拉曼频移作用.

此外,方程(1)中涉及到的损耗项对求解的结果也有影响,具体与实际光纤的长度有关,对于典型的光纤损耗 0.2dB/km 来说,损耗长度 $L_a = 1/\alpha \approx 21.7\text{km}$,只要环长 $L \ll 21.7\text{km}$ 就可以不考虑损耗的影响.在归一化情况下,损耗的影响则和色散长度 L_D 和 NOLM 的归一化长度 $\xi_L = L/L_D$ 有关.如果假设入射脉冲脉宽为 1ps ,则对于普通单模光纤(SMF)(GVD 参量 $\beta_2 \approx -20 \text{ps}^2/\text{km}\cdot\text{nm}$), $L_D \approx 50\text{m}$;对于色散位移光纤(DSF)($\beta_2 \approx -2 \text{ps}^2/\text{km}\cdot\text{nm}$), $L_D \approx 500\text{m}$;而如果假设入射脉冲脉宽为 10ps ,则对于 SMF, $L_D \approx 5\text{km}$ 对于 DSF, $L_D \approx 50\text{km}$.可见对于 1ps 脉冲来说,无论是 SMF 还是 DSF,在几倍色散长度范围内是可以忽略损耗影响的;而对 10ps 脉冲来说,只有在环长 \ll 色散长度,即 $\xi_L \ll 1$ 的情况下可以忽略损耗.

3. NOLM 透过特性与环长的基本关系

为了研究 NOLM 的透过率、压缩比,首先定义以下两个参量:

$$F = \frac{\tau_0}{\tau_{\text{comp}}}, \quad Q = \frac{\int |u_{\text{comp}}|^2 d\tau}{\int |u_0|^2 d\tau}, \quad (3)$$

其中 τ_0 和 τ_{comp} 分别是入射脉冲和出射脉冲(或者认为是被压缩脉冲)的脉宽, u_0 和 u_{comp} 分别是相应的归一化复振幅.按照这种定义, F 就是脉冲的压缩比, Q 就是透过率或者看作脉冲压缩的品质因素.

对无损耗情况下,分别取 $R = 0.4, 0.42$ 和 0.45 ,计算了不同环长 NOLM 的脉冲透过率、压缩比,得到了透过率的第一极大值与 ξ_L ,第一极大值处压缩比 F 与 ξ_L ,以及第一极大值处 N 与 ξ_L 的关系图,如图 1 所示.图中曲线分辨率为 $\Delta\xi_L = 0.1$.

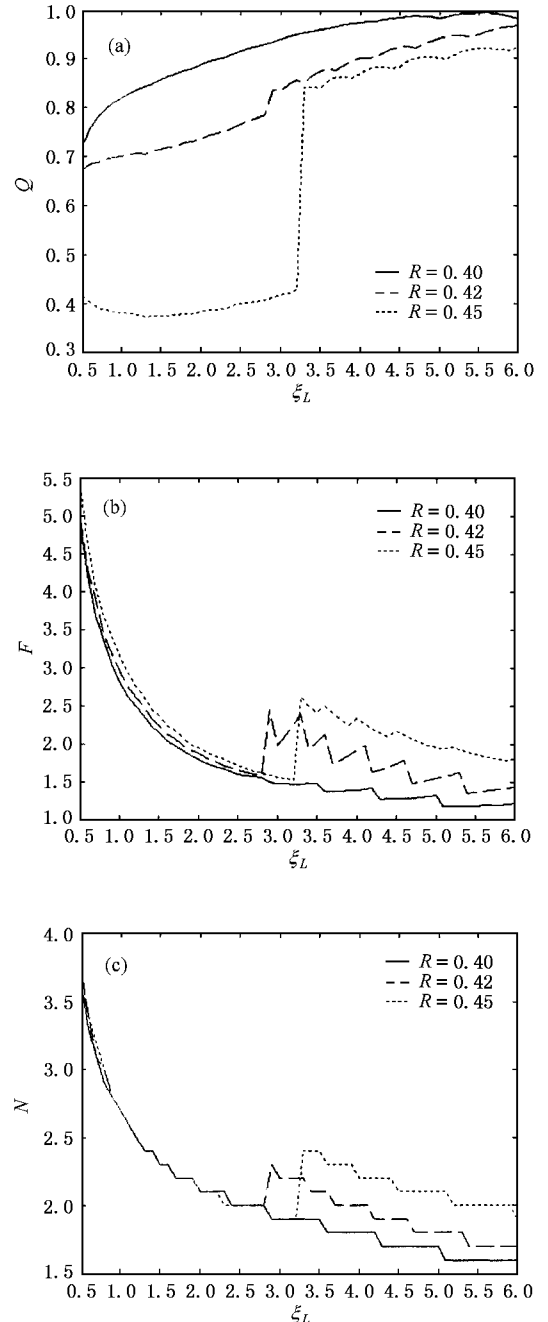


图 1 入射脉冲经过 NOLM 后,透过率的第一极大值(a),第一极大值处脉冲的压缩比(b)和相应的 N 值(c)分别在 $R = 0.4, 0.42$ 和 0.45 条件下与归一化环长 ξ_L 的函数关系

我们发现在图 1(a)中 $R = 0.45$ 对应的曲线, (b)和(c)中 $R = 0.42$ 和 0.45 对应的曲线都有明显

的阶跃现象.对 $R = 0.42$ 和 0.45 来说分别位于 $\xi_L = 2.9$ 和 $\xi_L = 3.3$ 处,为此首先单独研究这两处的情况.对这两处给出了透过率与 N 的关系图,如图 2 所示.可以看到,第一极大值突变所对应的透过率曲线有分裂现象,原本应该出现极大的地方变得类似拐点.同时也发现 R 的增大使得透过率曲线变得不平滑,最大透过率也变小,因此下面的讨论选用 $R = 0.4$.从图 1 中 $R = 0.4$ 的曲线来看,第一极大透过率随环长的增加而上升并趋于略小于 1 的某个极限值,压缩比也是渐进趋于某个略大于 1 的值,而相应的 N 趋于 1.6 左右.这个极限其实就是环内脉冲的一阶孤子近似条件,事实上如果取 $N = 1.6$,那么环内功率占 40% 的那个脉冲所对应的孤子阶数近似为 1.同时还可以看到对于透过率的第一极大值,环长较短时透过率偏小,所需的 N 也较大,但压缩效

果却很明显.相反,环长较长的时候,透过率很大,所需 N 较小,但没有明显的压缩效果.下面将分别就短环和长环两种情况详细讨论 NOLM 对脉冲的透过特性.

4. 短环 NOLM 的透过特性

所谓短环是指环的归一化长度 $\xi_L \ll 1$,也就是环长远小于色散长度的意思.取 $\xi_L = 0.1$,耦合器直通臂和交叉臂的耦合比 40:60,忽略光纤损耗,计算了 NOLM 的透过率和压缩比,如图 3 所示.在图中也画出了根据另外两个式子得出的透过率曲线,分别是连续波表达式^[5]

$$Q_{cw} = 1 - 2R(1 - R)\{1 + \cos[\xi_L(2R - 1)N^2]\}, \quad (4)$$

以及把脉冲时域各部分分别用(4)式求透过率然后求积分得到的总透过率的表达式,即

$$Q_p = 1/2 \int \text{sech}^2(\tau) Q_{cw}[N \text{sech}(\tau)] d\tau. \quad (5)$$

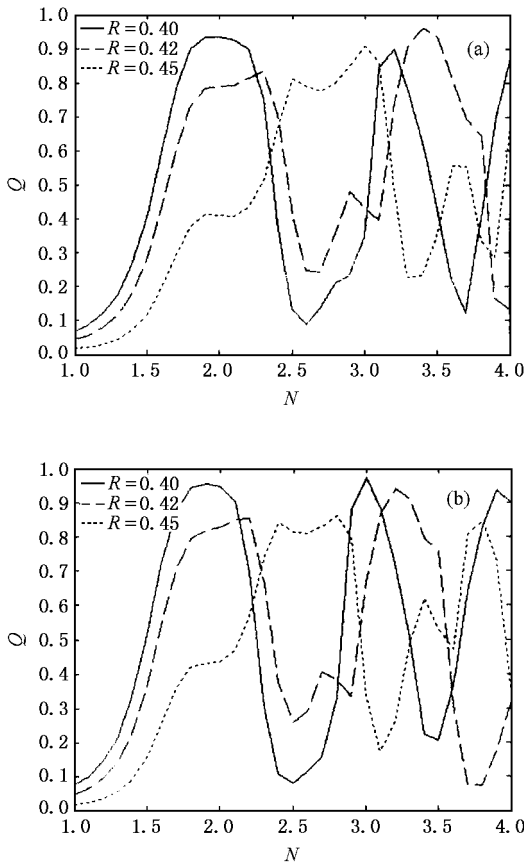


图 2 $\xi_L = 2.9$ (a) 和 $\xi_L = 3.3$ (b) 时, $R = 0.4, 0.42$ 和 0.45 条件下,脉冲透过率与 N 之间的关系

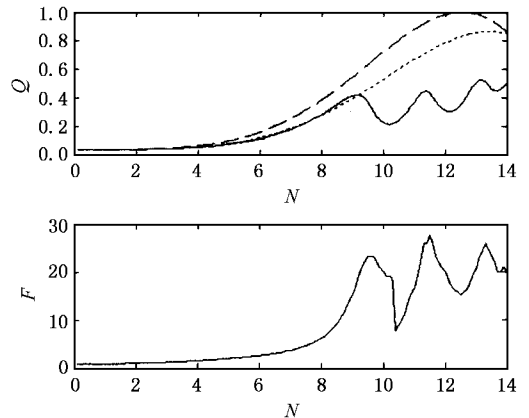


图 3 $\xi_L = 0.1$ 时,脉冲的透过率曲线和压缩比曲线(实线),虚线为利用(4)式得到的连续波透过率曲线,点线为利用(5)式得到的透过率曲线

由图 3 可以发现 NOLM 对脉冲的透过特性与连续波透过特性和(5)式所给出的曲线有明显不同,也不是严格周期性的等幅函数^[1].但在 N 较小的情况下,三种曲线基本重合,因为此时 GVD 效应和自相位调制(SPM)效应都很小,透过率主要由反向传播的两脉冲振幅差决定,即

$$Q \approx \frac{|\sqrt{R} \cdot \sqrt{R} \cdot N \text{sech}(\tau) - \sqrt{1 - R} \sqrt{1 - RN \text{sech}(\tau)}|^2}{|N \text{sech}(\tau)|^2} = (2R - 1)^2, \quad (6)$$

对 $R = 0.4$, 有 $Q \approx 0.04$, 也可以通过令(5)式中 $N = 0$ 得到.

随着 N 的增大, SPM 引起的非线性相移增加. 但由于环长较短, 当 N 不是太大的时候, 由 GVD 引起的脉冲变形基本可以忽略, 这样就可以利用(5)式来计算透过率. 事实上我们发现(5)式在到达透过率第一极大值之前都是很精确的. 透过率第一极大值为 0.42, 对应的 $N = 9.2$. 进一步提高 N 值, SPM 效应变得很大, GVD 效应不能忽略, 因为这时环内传输的是高阶孤子, 即使在很短的长度范围内也会引起脉冲显著的变形甚至分裂, 这也使(5)式不再适用.

通过图 3 同时也能发现, 获得透过率第一极大值所需的孤子阶数已经很高, 更重要的是进一步提高孤子阶数脉冲透过率的增加不大, 而且会出现由于高阶孤子效应引起脉冲分裂等不利因素, 所以认为短环相对比较有意义的区域在第一极大值以内. 此区域是脉冲压缩区, $N = 9.2$ 处脉冲压缩比可达 20 左右, 图 4 给出了这时 NOLM 输出的合成脉冲(实线)以及环内反向传输的两脉冲在合成输出前各自的脉冲形状(分别为虚线和点线).

冲具有明显的非线性啁啾特征, 而输出脉冲则接近线性啁啾, 可以用线性补偿方法, 如色散补偿光纤来消除脉冲中心部分的啁啾, 进一步窄化脉冲. 因此可以认为短环 NOLM 用来进行脉冲压缩效果要好于单纯利用孤子窄化作用的压缩.

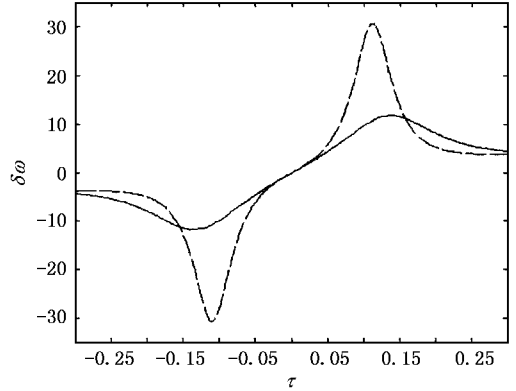


图 5 NOLM 输出脉冲(实线)和环内较强脉冲(虚线)的频率啁啾

另外考虑到输入脉冲往往带有一定的啁啾, 假设入射脉冲为

$$u(0, \tau) = N \operatorname{sech}(\tau) \exp\left(-\frac{iC\tau^2}{2}\right), \quad (7)$$

C 表示啁啾参量, 为简单起见只讨论初始啁啾为线性啁啾的情况. 分别取 $C = -2, -0.5, 0.5$ 计算得到了含啁啾脉冲的透过率和压缩比曲线, 如图 6 所示. 含啁啾脉冲的透过特性基本上与无啁啾情况类似, 区别仅仅是曲线发生了平移. 当 $C < 0$ 时, 曲线右移, $C > 0$ 时, 曲线左移, 平移量随 C 的增大而增大. 因此可以认为初始啁啾脉冲基本上具有和无啁啾脉冲类似的透过特性, 但对阈值有影响.

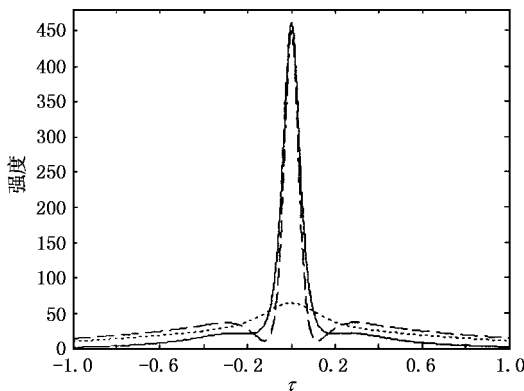


图 4 $\xi_L = 0.1, N = 9.2$ 时, 输出的合成脉冲(实线)以及环内反向传输的两脉冲在合成输出前各自的脉冲形状(分别为虚线和点线)

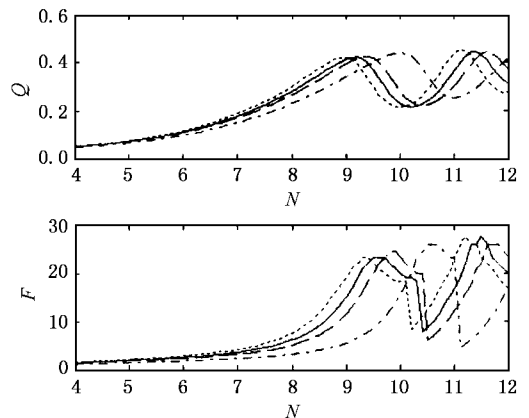


图 6 含啁啾脉冲的透过率曲线和压缩比曲线, 实线表示无啁啾, 点线、虚线、点划线分别表示 $C = 0.5, -0.5, -2$

5. 长环 NOLM 的透过特性

我们所指的长环是指环的归一化长度 ξ_L 达几个色散长度. 取耦合器耦合比 40:60, 忽略光纤损耗, 计算环长为 5.5 时 NOLM 的透过率和压缩比, 如图 7 所示. 可以看到透过率第一极大值的阈值明显降低, 为 $N = 1.6$, 相应的透过率也超过 99%, 但压缩比很小, 仅为 1.18. 这种情况事实上就对应了所谓的孤子开关 NOLM^[2]. 此外, 这种情况下, 初始啁啾将严重影响开关特性, 不但提高了阈值, 而且降低了透过率, 展宽了脉冲.

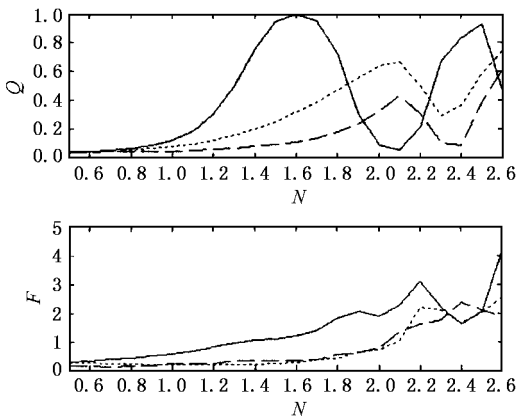


图 7 $\xi_L = 5.5$ 时, 脉冲的透过率曲线和压缩比曲线, 实线表示无啁啾, 虚线、点线分别表示 $C = -2$ 和 2

对图 7 的分析说明, 虽然此时脉冲无法得到压缩, 但却有很好的整形功能, 对脉冲孤子部分的透过率很高, 除可以过滤掉脉冲序列的直流分量外, 还可以得到更好的 sech 脉冲. 我们计算了 $\xi_L = 5.5$ 时, 峰值功率对应 $N = 1.5$, 消光比 5:1 的含直流 sech 脉冲的透过情况. 输入脉冲由于含有很大的直流分量(如由调制器产生的连续脉冲), 所以脉冲沿已经明显偏离 sech 形状, 但经过 NOLM 以后, 不但脉冲的直流分量被过滤, 而且当把输出脉冲和与它峰值功率、脉宽相同的 sech 脉冲相比较时, 两者非常吻合, 如图 8

所示.

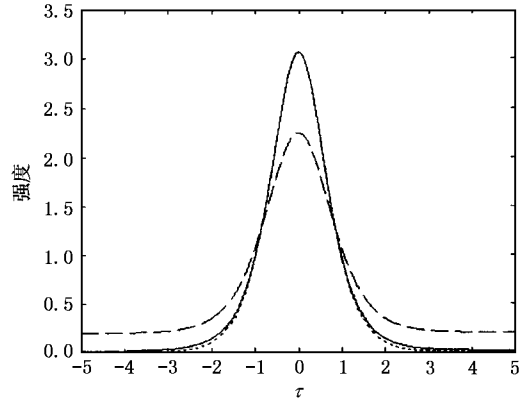


图 8 $\xi_L = 5.5, N = 1.5$ 时, 输入为含直流分量 sech 脉冲的透过输出脉冲, 实线为输出脉冲, 虚线为输入脉冲, 点线为幅度和输出脉冲相同的 sech 函数

6. 结 论

从归一化的 NLSE 出发, 研究了反常色散区 NOLM 的脉冲透过特性, 得到了脉冲情况下 NOLM 周期性透过率的第一极大值、第一极大值处的压缩比和相应的孤子阶数与环长的关系. 根据分析长环和短环两种情况下透过率和压缩比特性两方面的各自特点, 发现长环 NOLM 有利于脉冲整形, 而短环 NOLM 有利于脉冲压缩. 被短环 NOLM 压缩后输出的脉冲含有近似线性啁啾, 利用线性色散补偿方法可以进一步窄化脉冲, 这说明短环 NOLM 与色散补偿相结合是一种可取的脉冲压缩方法, 可以得到良好的压缩效果. 同时发现脉冲的初始啁啾对短环压缩的影响较小, 但严重影响长环的开关特性, 不但会提高获得最大透过率的功率阈值, 而且引起了脉冲的展宽. 由于所有的讨论都是基于归一化模型, 所以得出的结论不受具体光纤和脉冲参数影响, 而本文给出的图表则对具体应用中脉冲和 NOLM 的参数选择有指导作用.

[1] Doran N J and Wood D 1988 *Opt. Lett.* **13** 56

[2] Blow K J, Doran N J and Nayar B K 1989 *Opt. Lett.* **14** 754

[3] Islam M N *et al* 1989 *Opt. Lett.* **14** 811

[4] Smith K and Doran N J 1990 *Opt. Lett.* **15** 1294

[5] Agrawal G P 2002 *Nonlinear Fiber Optics*, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics Trans. Jia D F *et al* (in Chinese) [贾东方、余震虹等译 2002 非线性光纤光学原理及应用(北京:电子工业出版社)]

Study of pulse transmission properties in nonlinear optical loop mirror^{*}

Tan Bin[†] Li Zhi-Yong Li Shi-Chen

(*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University ,
Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science , EMC , Tianjin 300072 , China*)

(Received 17 October 2003 ; revised manuscript received 14 December 2003)

Abstract

We have studied the pulse transmission properties in a nonlinear optical loop mirror (NOLM) with abnormal dispersion and obtained the first maximum of transmission, the compression ratio and related soliton order at the first maximum as functions of normalized loop length. With the comparison of transmission and compression properties of both transmission limited and chirped pulses in long and short loop length NOLMs, we conclude that long NOLM is fit for pulse shaping, while short NOLM is fit for pulse compression.

Keywords : nonlinear optical loop mirror , transmission , compression ratio , soliton order

PACC : 4280A , 4280M , 4265S

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69877012).

[†] E-mail : tanmc@263.net , Tel 022-27402420.