

[3] R. Beck, *Scien. Tech. Infor.*, 9-5(1989), 187.

社(1987), 284.

[4] A. W. 罗曼著, 虞祖良译, 光学信息处理, 清华大学出版

[5] 母国光、战元龄, 光学, 人民教育出版社(1978), 397.

怎样才能有效地观察光孤子

翟华金 李宝其

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

到目前为止, 国内仍没有成功地令人信服地观察和记录光孤子, 要完成这一突破还需作艰苦的努力. 该文论述了光孤子存在的物理条件, 指出了国内为成功观察光孤子而开展的基础研究和应用研究的方向.

光孤子的观察以其苛刻的实验条件和高的技术要求, 直到1980年才由 Mollenauer 等^[1]首次在 Bell 实验室实现, 这已是 Hasegawa 等^[2]从理论上预言光孤子存在的八年之后. 光孤子的成功观察不仅有力地验证了光孤子理论, 同时导致了光孤子研究和光孤子通信等领域的一系列重大突破: 在孤子激光器方面, Mollenauer 等人^[3]于1984年研制成功的色心孤子激光器, 在孤子研究中发挥了积极作用; Smith 等人^[4]于1991年研制成功可以全光纤集成的掺铒光纤孤子激光器, 以其巨大优势在孤子研究和实用孤子通信系统中表现出强大的竞争力; 在实验室孤子传输方面, 利用周期性能量补偿(包括拉曼放大、掺铒光纤放大和半导体激光放大等)以克服光纤损耗, 可实现长距离孤子传输, 其中 Mollenauer 等^[5]利用周期性掺铒光纤放大已成功地观察到12000km 距离上孤子的传输; 在实用化方面, 美国、日本正着手将孤子通信系统推向实用, 这无疑将是通信领域的又一次革命.

一、光孤子的传输方程

光脉冲在光纤中的传输可由下面的方程进行有效的描述:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \partial A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \partial |A|^2 A, \quad (1)$$

式中 $A(z, t)$ 为脉冲包络振幅, $T = t - z/v_g$ 为内

禀坐标系(即以群速 v_g 运动的坐标系)中的时间. (1)式计及的主要效应有:

(1)右端第一项描述光纤的线性损耗, α 为损耗系数.

(2)右端第二项描述光纤群速度色散(GVD), GVD 是指不同波长的成分在光纤中传输群速度不一样的性质, $\beta_2 \approx -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$ (D 为通常的色散参数)为 GVD 参数. 以光纤的零色散波长 λ_0 为分界点, 当 $\lambda > \lambda_0$ 时为光纤的负 GVD 区域, 在此区域内高频成分传输快, 低频成分传输慢; 当 $\lambda < \lambda_0$ 时则相反.

(3)右端第三项描述光纤的自相应调制(SPM)效应^[6], 它由光纤的非线性 Kerr 效应所引起, 使光脉冲在包络内的不同时刻表现为不同的频率. 由于光纤中的 SPM 效应, 脉冲的前沿频率将降低, 后沿频率将升高, 于是在脉冲中部形成了“红头紫尾”的啁啾, 如图1, 其中 n_2 为光纤的非线性系数, K 为真空中的波数, L 为脉冲在光纤中传输的距离.

值得指出的是, (1)式没有考虑高阶的非线性效应, 当脉宽 $< 100\text{fs}$ 时需引入一些高阶的修正项(如高阶色散项、脉冲自变陡项、脉冲自频移项等), 才能完整地进行描述.

由上述讨论显然可以看出, 只有脉冲波长落在光纤的负 GVD 区域时, 由 SPM 形成“红头紫尾”的啁啾脉冲, 负 GVD 使脉冲的低频前沿

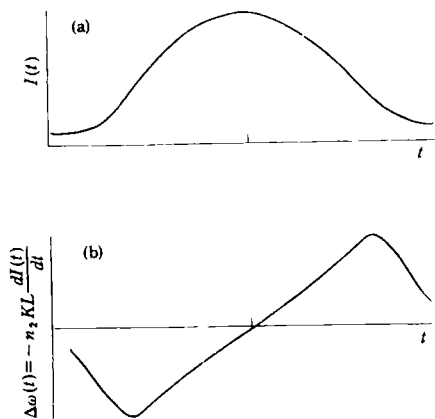


图1 光脉冲(a)及其频率啁啾(b)

传播慢,高频的后沿传播快,从而消除啁啾,二者才可能相互补偿,形成“自持”的孤子;反之,SPM和正GVD的结合只能导致脉冲的展宽.应当注意到,SPM效应与光强有关,而GVD仅与频谱的丰富程度相联系,因此,通过调节光脉冲的峰值功率,可以改变SPM和GVD二者之间的对比关系,从而改变光脉冲在光纤中的演变特性.理论和实验已经证明,在忽略损耗项时,调整脉冲峰值功率等于某一临界功率(即基阶孤子功率 P_1),SPM刚好能补偿负GVD引起的脉冲展宽,脉冲在传输过程中将永不变形;当脉冲功率小于此临界功率,SPM不足以补偿GVD引起的脉冲展宽,脉冲在传输过程中将不断展宽;当脉冲功率高于此临界功率,在脉冲演变的初期,SPM引起的压缩超过GVD引起的展宽(随着脉冲的演化,二者之间的对比关系将发生变化,决定了整个演化过程的复杂性),因此脉冲在演变初期表现为变窄,这一变窄效应奠定了腔外脉冲压缩的一种主要技术的基础^[7].

光孤子理论给出孤子阶数 N ,基阶孤子功率 P_1 和孤子周期 z_0 的计算公式分别为

$$P_1 = |\beta_2|/rT_0^2, \quad (2)$$

$$N^2 = P_0/P_1 = rP_0T_0^2/|\beta_2|, \quad (3)$$

$$z_0 = \pi T_0^2/2|\beta_2|, \quad (4)$$

式中 T_0 为脉冲宽度, P_0 为脉冲峰值功率.对(1)式作变换,

$$U = A/\sqrt{P_0}, \xi = z|\beta_2|/T_0^2, \\ \tau = T/T_0, \Gamma = \alpha T_0^2/2|\beta_2|, \quad (5)$$

再令

$$U = NU[\alpha T_0^2/|\beta_2|]^{1/2}A, \quad (6)$$

可得归一化方程

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + |U|^2U = -i\Gamma U. \quad (7)$$

(7)式为光孤子理论中更为常用的形式.忽略光纤损耗项时,(1)式或(7)式通常被称为非线性薛定谔(NLS)方程.

二、光孤子传输的物理条件

1. 光纤损耗足够小

孤子解由NLS方程导出,它忽略光纤的损耗或增益,因此严格的孤子对应于光纤无损耗、无增益的情形,这显然只有理论上的意义,实验上是难以办到的.光纤损耗所以有害,是因为损耗不断降低脉冲的峰值功率,从而破坏了起始时SPM和GVD之间的平衡.

从数学上看,在(7)式中,视 Γ 项为微扰,取输入脉冲为基阶孤子脉冲

$$u(0, \tau) = \text{sech}(\tau), \quad (8)$$

则利用逆散射方法可得(7)式的一级近似解的形式为^[8,9]

$$u(\xi, \tau) = u_1 \text{sech}(u_1 \tau) \exp(i\sigma), \quad (9)$$

其中

$$u_1 = \exp(-2\Gamma\xi), \quad (10)$$

$$\sigma = [1 - \exp(-4\Gamma\xi)]/8\Gamma. \quad (11)$$

注意到 $u_1 \tau \equiv \tau_1 = T/T_1, \tau = T/T_0$,有

$$T_1 = T_0 \exp(2\Gamma\xi) = T_0 \exp(\alpha z). \quad (12)$$

(7)式的数值解表明上述结果对 $\alpha z \ll 1$ 是很精确的.

当 $\Gamma=0$,即不存在损耗时,(9)式退化为基阶孤子解:

$$u(\xi, \tau) = \text{sech}(\tau) \exp(i\xi/2), \quad (13)$$

这意味着,若选择双曲正割脉冲,使其 $N=1$,则在无损耗光纤中,该脉冲在任意长距离上均将无畸变地传输.这正是基阶孤子的特征.

(10)式和(12)式表明,在存在损耗的情况

下,基阶孤子脉冲振幅将随传输距离指数衰减,脉宽则指数增加.对于高阶孤子,其脉宽随传输距离几经振荡之后,也表现为单调上升.

由此可见,实验上要成功地观察光孤子,要求 $\Gamma\xi \ll 1$ 或 $\alpha z \ll 1$,使由(10)式和(12)式决定的脉冲振幅和脉宽随传输距离几乎不发生变化.换言之,这即是要求光纤损耗较小(典型要求是光纤损耗 $< 1\text{dB/km}$),同时要求观察距离不能太长(当损耗为 0.2dB/km 时,要求观察距离小于 10km).

2. 光源波长合适

如前所述,光孤子是 SPM 和负 GVD 共同作用的结果,故光源的工作波长一定要在光纤的负 GVD 区域,对于硅光纤,其零色散波长 $\lambda_0 \sim 1.3\mu\text{m}$,因此要求光源工作波长 $\lambda > 1.3\mu\text{m}$. 目前已报道的最常用的孤子研究光源为色心激光器,工作波长为 $\sim 1.5\mu\text{m}$. 此外 Nd:YAG 为 $1.32\mu\text{m}$ 、参量源 $1.6\mu\text{m}$ 等也用于孤子研究之中. 现代光纤技术已能对光纤的色散特性进行某些修改,研制出色散上移光纤和下移光纤(典型产品的零色散波长 λ_0 分别约为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $1.275\mu\text{m}$),色散下移光纤技术为在更宽的波长范围上观察光孤子提供了可能.

对于波长不在负 GVD 区域的脉冲,则 SPM 非但不能补偿 GVD 引起的脉冲展宽,相反地,SPM 引起的频谱展宽丰富了频谱,从而进一步增强了 GVD 引起的脉冲展宽,这时显然不能观察到光孤子.理论和实验研究表明,在正 GVD 区域存在着另一类光孤子,称为暗孤子(dark solitons)^[10],但这已超出我们讨论的范围.

3. 脉冲功率足够大

孤子理论和实践表明,满足 $n-1/2 < N < n+1/2$ (n 为自然数, N 为孤子阶数)的光脉冲,可通过 SPM 和 GVD 之间的相互作用,经一定距离的光纤演变,最终达到 n 阶孤子的传输.一般地,为进行孤子的有效观察,都尽量将脉冲的功率调节到使 N 接近整数的情形,以省去复杂的演化过程,从这个意义上说,只有满足 $N \geq 1$ 即峰值功率 $P_0 \geq P_1 = |\beta_2|/rT^2$ 的光脉冲才可以

有效地观察孤子(基阶的或高阶的),否则脉冲在光纤中传输时 SPM 不足以完全补偿 GVD 引起的脉冲展宽.要满足此功率条件,可以考虑以下途径:(1)提高激光器的输出功率,从而提高 P_0 ;(2)利用锁模或腔外压缩技术减小输出脉宽,从而极大地提高脉冲峰值功率 P_0 ;(3)增大输出脉宽,从而降低 P_1 ;(4)采用 $|\beta_2|$ 较小的色散移动光纤,从而降低 P_1 .注意到其中(2),(3)是不可兼顾的,同时考虑到研究光孤子的原因之一,是实现高码率大容量长距离孤子通信,利用(3)来实现孤子观察显然是违背初衷的.基于上述考虑,典型的孤子研究光源均采用高功率锁模激光器,输出脉宽为 ps 量级、亚 ps 量级直至更窄.另外,利用 $|\beta_2|$ 较小的色散移动光纤可实现激光功率较小时的孤子观察.

有效观察光孤子的临界功率 P_1 ,在波长为 $1.55\mu\text{m}$ 时以典型硅光纤的 β_2, γ 参数代入.当 $T_0 = 1\text{ps}$ 时, $P_1 = 5\text{W}$;当 $T_0 = 10\text{ps}$ 时, $P_1 = 50\text{mW}$.若利用 $\beta_2 = -2\text{ps}^2/\text{km}$ 的色散移动光纤, P_1 将下降到 $1/10$.

另外,若考虑光纤损耗,形成孤子有一个最小能量条件:^[11]

$$\frac{P(\text{W})}{S(\mu\text{m}^2)} > 1.9 \times 10^{-3} \alpha (\text{dB/km}), \quad (14)$$

式中 P 为脉冲峰值功率, S 为光纤的有效截面积,括号内为该公式中各物理量所取的单位.这是形成孤子的能量下限,小于此功率的脉冲,即使其基阶孤子功率再小,也不能形成孤子.这是因为形成孤子时非线性 SPM 的建立需要一个过程(即需经过一定长度的光纤),此过程的快慢依赖于脉冲功率.脉冲功率较小时,较快的损耗过程淹没了较慢的孤子形成过程.可以证明,如果利用拉曼放大使光纤的有效损耗降为零,则上述最低能量条件不复存在.

4. 光脉冲应为傅氏极限脉冲

理想的光孤子应当是无啁啾的双曲正割脉冲.啁啾对孤子传输所以有害,是因为啁啾附加在 SPM 引起的啁啾之上,影响了基阶孤子中 SPM 和 GVD 之间的精确平衡.

设输入光纤的脉冲为具有啁啾的双曲正割

基阶脉冲, NLS 方程的数值解显示, 对较小的正啁啾, 脉冲在演变初期表现为压缩, 随后发生展宽, 然后再次压缩并在主脉冲两旁形成次脉冲

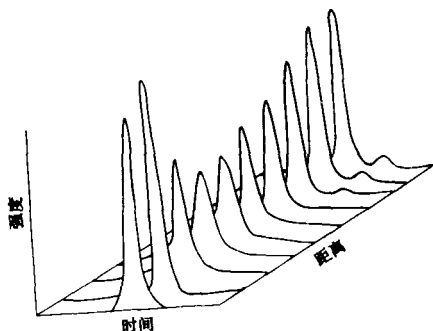


图2 含较小正啁啾的双曲正割基阶脉冲在光纤中的演变

(如图2所示). 通过抓住脉冲传输过程中 SPM 和 GVD 之间对比关系可方便地理解这一演化过程. 对较小的负啁啾, 亦发生类似演变.

上述结果表明, 啁啾较小时孤子仍能形成. 因为孤子对弱的微扰通常是稳定的, 可通过脉冲宽的调整而获得 SPM 和 GVD 之间的平衡; 但当啁啾超过某一临界值时, SPM 和 GVD 之间的平衡被破坏, 数值结果显示, 孤子将根本不能形成.

为了有效地观察孤子, 必须利用接近傅氏变换极限的脉冲, 因此大多数孤子实验均用无啁啾的光源——色心激光器完成. 对于有啁啾的光源可预先利用适当的方法(例如光栅对色散延迟线或棱镜组等)进行补偿.

5. 光源功率稳定性足够好

光源功率的稳定性, 直接关系到光孤子的阶数 N 的稳定性, 从而关系到脉冲演变过程的稳定性. 例如对基阶孤子要求 $N=1$, 当光源功率起伏时, N 值亦起伏, 脉冲或展宽或变窄, 利用相关法或其他方法均不能进行有效记录. 超短光脉冲的探测要求光脉冲稳定性高, 重复性好, 故利用起伏厉害的光源根本谈不上孤子的观察.

三、为早日观察到光孤子而努力

前面讨论了观察光孤子的基本条件, 我们注意到条件1与光纤的损耗有关, 但这对于现代光纤技术已不算一个问题, 国产光纤完全可以达到这一要求. 而光孤子传输的物理条件2—5均对光源提出了近乎苛刻的要求, 就目前水平看, 国产激光器很难达到这一要求, 尤其是在功率及其稳定性方面. 光源问题正是我国光孤子基础研究和应用研究难以深入的症结所在. 研制工作波长 $\lambda > 1.3 \mu\text{m}$ (最好工作在光纤的最低损耗窗口 $1.55 \mu\text{m}$ 附近) 的高功率、高稳定性的锁模光源已经成为摆在我国科技工作者面前的一个亟待解决的课题, 我们必须高质量地完成它, 实现孤子研究和孤子实用化系统的光源国产化. 只有这样, 才能完成观察光孤子的零的突破, 打破国内光孤子研究停留在理论上和数值计算上的局面, 让光孤子走进实验室, 走进孤子通信、光计算、超快现象研究、超高速光电器件研制等一系列基础研究和应用研究的广阔领域.

- [1] L. F. Mollenauer et al., *Phys. Rev. Lett.*, **45**(1980), 1095.
- [2] A. Hasegawa et al., *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973), 142.
- [3] L. F. Mollenauer et al., *Opt. Lett.*, **9** (1984), 13.
- [4] K. Smith et al., *Electron. Lett.*, **27** (1991), 244.
- [5] L. F. Mollenauer et al., *Electron. Lett.*, **27** (1991), 178.
- [6] E. P. Ippen et al., *Appl. Phys. Lett.*, **24**(1974), 190.
- [7] L. F. Mollenauer et al., *Opt. Lett.*, **8** (1983), 289.
- [8] A. Hasegawa et al., *Proc. IEEE*, **69**(1981), 1145.
- [9] K. J. Blow et al., *Opt. Commun.*, **42**(1982), 403.
- [10] A. Hasegawa et al., *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973), 171.
- [11] A. Hasegawa, *Optical Solitons in Fibers*, Springer-Verlag, Berlin, (1989), 39.