

光纤零色散波长的精确测量

曹文华^{1), 2)} 李沈平¹⁾ 陈锦泰¹⁾ 刘颂豪³⁾

- 1), 香港中文大学电子工程学系, 香港
- 2), 五邑大学电子与信息工程系, 广东 529020
- 3), 华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631

摘 要 提出了一种测量单模光纤零色散波长的新方法, 即让可调谐的连续波(波长 λ_s) 和波长 λ_p 位于光纤正常色散区的泵浦脉冲串在光纤中共同传输, 交叉相位调制与群速度色散的相互作用可使得连续波的强度得到调制。对连续波 λ_s 进行调谐, 若连续波被调制为亮脉冲, 则表明 λ_s 位于光纤负色散区; 若连续波被调制为暗脉冲, 则表明 λ_s 位于光纤正色散区; 若连续波的强度不能被调制, 则表明 λ_s 位于光纤的零色散波长 λ_0 附近。利用这一方法对长度为 0.98 km 的色散位移光纤的零色散波长进行了测量, 测量精度可达 0.5 nm。

关键词 零色散波长, 群速度色散, 交叉相位调制, 亮脉冲, 暗脉冲。

1 引 言

在长距离光纤通信系统中, 群速度色散(GVD)往往是必须首先考虑的因素。对于线性传输, 必须使信号波长 λ_s 尽量靠近光纤的零色散波长 λ_0 , 以便最大限度地抑制由于群速度色散引起的脉冲展宽; 对于光孤子传输, 必须确保 $\lambda_s > \lambda_0$, 以便达到自相位调制(SPM)与群速度色散相互抵消的目的; 而在色散补偿系统中^[1], 也必须知道整段光纤的 λ_0 平均值, 以便通过适当选取信号波长的办法来抑制诸如四波混频和自相位调制这一类非线性效应对信号传输的影响。不仅如此, 光纤的 λ_0 还随环境因素(如压力、温度等)的变化而变化^[2]。因此, 在设计光纤通信线路时, 能否准确获知被选用光纤的 λ_0 值便显得至关重要。

传统的用于测量 λ_0 的方法有脉冲延时法^[3]、相移法^[4]、干涉法^[5]、以及模场直径法^[6]。这些方法各有所长, 但存在一个共同的缺点, 即为了提高测量精度, 必须在很宽的波长范围内进行逐点测量, 而且均需要对大量的测量数据进行曲线拟合, 不仅费时费力, 而且对测量条件要求很高。因此, 近年来不断有人提出了其它测量方法, 如基于光纤中调制不稳定性的脉冲放大法^[7]、基于将相位调制转换为振幅调制的 PM-AM 转换法^[8, 9]、以及四波混频法^[10, 11]。脉冲放大法能直接测量 λ_0 值, 但必须同时对泵浦波长和信号波长进行调谐, 而且测量过程中受受激布里渊散射效应的影响较大; PM-AM 转换法不仅可以直接测量 λ_0 值, 而且省去了泵浦波, 但很明显地受到光纤损耗的影响(由于无放大机制), 因而测量精度较低; 四波混频法利用泵浦波与探测波之间的混频效应, 通过对泵浦波长 λ_p 进行调谐, 当 λ_p 接近光纤的 λ_0 时,

便满足一定的相位匹配条件,从而产生新的混频信号。但如果光纤的 λ_0 值存在纵向不均匀性,或不同 λ_0 值的光纤相继连接时,四波混频法很难测出整条光纤的 λ_0 平均值。

本文提出一种测量光纤 λ_0 值的新方法。该方法利用光纤中交叉相位调制(XPM)与群速度色散两种效应的相互作用,使得与另一泵浦脉冲共同传输的连续波的强度得到调制。通过对连续波波长进行调谐,从普通示波器上便可直接判断出被测光纤的 λ_0 值。实测结果表明,该方法不仅简单易行,而且具有较高的测量精度。

2 测量原理

2.1 理论模型

考虑一串泵浦脉冲和一个连续波(也称为信号波)在光纤中共同传输,两者的偏振方向相同但波长不同。在慢变包络近似下,它们的振幅由下述耦合非线性方程组描述^[12, 13],

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + \frac{\alpha_p}{2} A_p = i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + \frac{\alpha_s}{2} A_s = i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_p|^2) A_s, \quad (2)$$

式中 $A_j(z, t)$ 为光波的复振幅($j = p, s$ 分别代表泵浦波和信号波), v_{gj} 为光波的群速度, β_{2j} 为群速度色散系数, α_j 为光纤损耗系数,在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近, $\alpha_j \approx 0.2 \text{ dB/km}$ 。 γ_j 为非线性系数,它与非线性折射率系数 n_2 的关系为 $\gamma_j = 2\pi n_2 / (\lambda_j A_{\text{eff}})$, 其中 A_{eff} 为光纤有效芯径面积, λ_j 为光波波长。作变换

$$\begin{aligned} \tau &= (t - z/v_{gp})/T_0, & \xi &= z\beta_{2p}/T_0^2, \\ u_p &= (\gamma_p T_0^2/\beta_{2p})^{1/2} A_p, & u_s &= (\gamma_s T_0^2/\beta_{2p})^{1/2} A_s, \end{aligned} \quad (3)$$

(1) 式、(2) 式则可表示成下述无量纲形式

$$\frac{\partial u_p}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u_p}{\partial \tau^2} + \Gamma_p u_p = i(|u_p|^2 + 2|u_s|^2) u_p, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial \xi} - \delta \frac{\partial u_s}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{2s}}{\beta_{2p}} \frac{\partial^2 u_s}{\partial \tau^2} + \Gamma_s u_s = ir(|u_s|^2 + 2|u_p|^2) u_s, \quad (5)$$

式中 T_0 为泵浦脉冲在 $1/e$ 功率处的初始半宽度, $r = \lambda_p/\lambda_s$ 为泵浦波和信号波的中心波长之比。 Γ_p 、 Γ_s 由下式给出,

$$\Gamma_p = \frac{\alpha_p T_0^2}{2 \beta_{2p}}, \quad \Gamma_s = \frac{\alpha_s T_0^2}{2 \beta_{2p}}. \quad (6)$$

(4) 式左边的第二项和(5) 式左边的第三项表示各波在传输过程中的群速度色散效应,(4) 式和(5) 式右边的第一项和第二项分别表示各波在传输过程中的自相位调制效应和由于另一光波的存在而引起的交叉相位调制效应。(5) 式左边第二项表示由于两波群速度不同所引起的传输过程中的相互离散。离散参数 δ 的表示式为

$$\delta = T_0(v_{gp}^{-1} - v_{gs}^{-1})/\beta_{2p}, \quad (7)$$

若 λ_p 与 λ_s 比较靠近,而且两波在光纤中的传输距离远小于色散长度 $L_D(L_D = T_0^2/\beta_{2p})$, 则离散效应对信号波演化的影响可忽略不计^[13]。

$u_p(0, \tau)$ 、 $u_s(0, \tau)$ 分别为泵浦波和信号波在光纤输入端的初始值,设它们具有以下形式

$$u_p(0, \tau) = A_1 \sum_n \exp[-\frac{1}{2}(\tau + nq_0)^2], \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (8)$$

$$u_s(0, \tau) = A_2, \quad (9)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为泵浦脉冲串的峰值振幅和信号波振幅。组成泵浦脉冲串的各脉冲具有高斯形状, 且具有相同的峰值振幅和相同的脉宽。参数 q_0 表示相邻泵浦脉冲的初始间距。对于给定的初始条件(8)式、(9)式, 采用分步傅里叶变换对方程组(4)式、(5)式进行数值求解便可得到信号波的演化结果。

2.2 $\beta_{2p} > 0$ 且 $\beta_{2s} < 0$ 情况

这种情况相当于泵浦波长和信号波长分别位于光纤正、负色散区^[14]。在(8)、(9)两式中, 令初始泵浦脉冲的峰值振幅和信号波振幅分别为 $A_1 = 25$, $A_2 = 1$ 。泵浦脉冲串中相邻脉冲的初始间距 $q_0 = 8$ (相当于泵浦脉冲初始半宽度 T_0 的 8 倍)。假设光纤的零色散波长 λ_0 近似位于泵浦波长 λ_p 和信号波长 λ_s 的中间位置上, 并且比较靠近于 λ_p 和 λ_s 。这样在(5)式中有 $\delta \approx 0$, $\beta_{2s}/\beta_{2p} \approx -1$, 以及 $r \approx 1$ 。

图 1(a) 和图 1(b) 分别示出上述泵浦波和信号波在光纤中的共同传输情况。根据(3)式, 这里的时间已用泵浦脉冲初始半宽度 T_0 归一化, 传输距离已用色散长度 T_0^2/β_{2p} 归一化。图 1(b) 表明, 在泵浦波的影响下, 信号波逐渐演化成一串重复率与泵浦脉冲完全相同的、宽度比泵浦脉冲更窄的信号脉冲串。其基本原理是: 泵浦脉冲的存在导致与其重叠的那部分信号波由于交叉相位调制效应而产生正频率啁啾, 即该部分从前沿到后沿的频率逐渐增大。在光纤负色散区, 由于群速度随频率的增大而增大, 这就使得该部分信号波的前沿传输得愈来愈慢, 后沿愈来愈快, 从而导致了能量的堆积和脉冲的形成。泵浦脉冲愈强, 产生的信号脉冲也愈强^[14]。

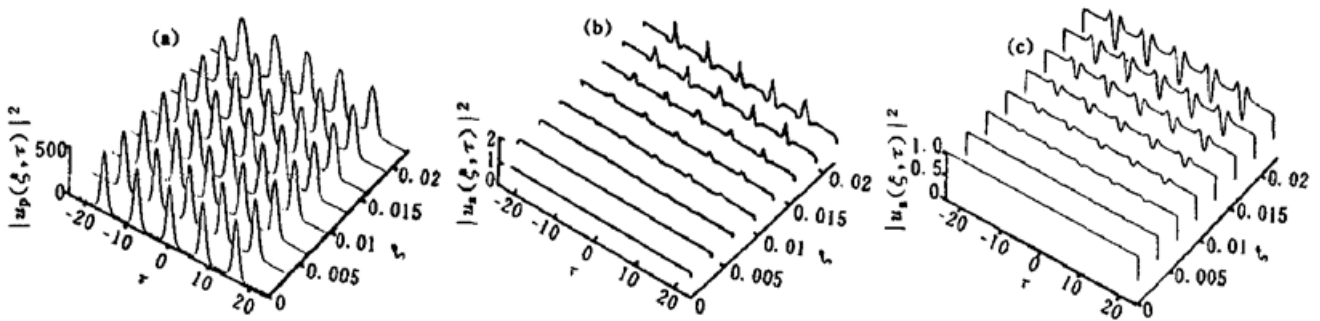


Fig. 1 Evolution of (a) a pump pulse train in the normal-dispersion regime and (b) a cw signal in the anomalous-dispersion regime when they copropagate in an optical fiber. (c) is same as that in (b) except that the wavelength of the signal is in the normal-dispersion regime of the fiber. The initial parameters are $A_1 = 25$, $A_2 = 1$, and $q_0 = 8$

2.3 $\beta_{2p} > 0$ 且 $\beta_{2s} > 0$ 情况

这种情况相当于 λ_p 和 λ_s 均位于光纤正色散区^[15, 16]。设泵浦波与图 1(a) 中完全相同, 信号波的初始振幅(或功率)也与图 1(b) 中相同, 但信号波长 λ_s 被调至光纤正色散区, 而且离 λ_p 较近。这时在(5)式中有 $\delta \approx 0$, $\beta_{2s}/\beta_{2p} \approx 1$, 以及 $r \approx 1$ 。图 1(c) 示出此时信号波的演化情况。可见信号波不再如图 1(b) 中那样演化为亮脉冲串, 而是演化为暗脉冲串。这一现象可作如下解释: 尽管与泵浦脉冲重叠的那部分信号波仍然由于交叉相位调制效应产生正频率啁啾, 但由于此时的信号波长位于光纤正色散区, 群速度随频率的增大而减小(正好与负色散区的情况相反), 这就使得该部分信号波的前沿传输得愈来愈快, 后沿愈来愈慢, 从而导致了暗脉冲的形成^[16]。

显然，在图 1(c) 中，若对 λ_s 进行调谐，让其逐渐接近光纤的零色散波长 λ_0 ，则在光纤输出端可观察到暗脉冲会愈来愈弱(由于群速度色散逐渐减小)。同样，在图 1(b) 中若让 λ_s 逐渐接近于 λ_0 ，也会观察到亮脉冲愈来愈弱。基于上述原理，通过对 λ_s 进行调谐便可很容易判断出光纤的零色散波长 λ_0 ，即在示波器上当观察到信号脉冲由亮转暗(或由暗转亮)时，此时的 λ_s 即是 λ_0 。

3 测量装置

测量装置框图如图 2 所示。光源包括一个边模抑制比大于 40 dB 的可调谐连续波单模

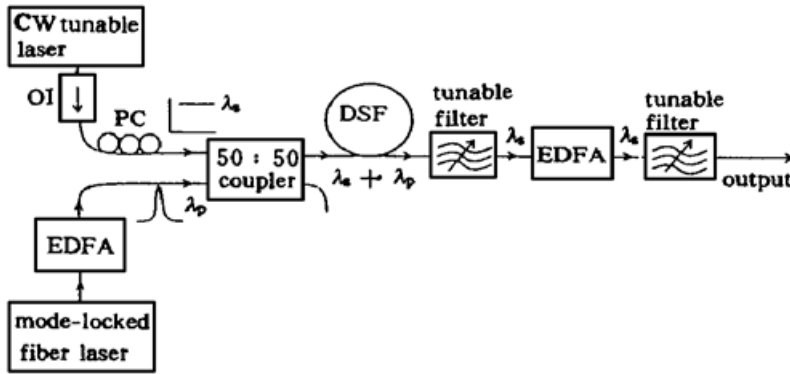


Fig. 2 Schematic of the apparatus. OI: optical isolator, PC: polarization controller, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, DSF: dispersion-shifted fiber, λ_s : signal wavelength, λ_p : pump wavelength

半导体激光器和一个主动锁模光纤环形激光器。图中的偏振控制器(PC)用于调节连续波的偏振态，使得泵浦波作用在连续波上的交叉相位调制效应最强。从光纤环形激光器输出的脉冲经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后作为泵浦脉冲。泵浦波(λ_p)和信号波(λ_s)通过一个 50·50 的耦合器耦合入一段长度为 0.98 km 的色散位移光纤(DSF)。在色散位移光纤输出端连接一个 3 dB 带宽约 0.7 nm 的可调谐法布里-珀罗滤波器，用于从色散位移光纤输出端提取信号

(λ_s)。在法布里-珀罗滤波器后接有第二个掺铒光纤放大器。最后，再在它的输出端连接另一个法布里-珀罗滤波器，用于消除由于放大产生的自发噪声。泵浦波和信号波的波形及频谱分别由快速采样示波器和光学频谱分析仪测量。

被测色散位移光纤由美国生产，其 λ_0 值约在 1561 nm 附近。泵浦波长被固定于 1550 nm，以保证其位于色散位移光纤的正常色散区。泵浦脉冲重复率为 776.4 MHz，脉冲宽度(FWHM)约 32 ps ($T_0 \approx 19$ ps)，谱宽(FWHM)约 0.15 nm。耦合入色散位移光纤输入端的泵浦脉冲峰值功率约 1.3 W，连续波信号功率约 2 mW。

4 测量结果

在整个测量过程中，固定泵浦波长 λ_p 不变，耦合入色散位移光纤输入端的泵浦功率和信号功率也不变，只需对信号波长 λ_s 进行调谐。图 3(a) 示出从示波器上直接观察到的色散位移光纤输入端的泵浦脉冲波形(20 次平均所得)。图 3(b)~ 图 3(f) 示出一组通过调谐 λ_s 从示波器上直接观察到的信号波形(20 次平均所得)，与之对应的 λ_s 依次为 1567 nm、1564 nm、1562 nm、1559 nm、以及 1555 nm。很明显，在图 3(b)、图 3(c)、图 3(e)、图 3(f) 四种情况下可观察到清晰的信号脉冲，它们的重复率均与泵浦脉冲相等，脉宽比泵浦脉冲更窄，而且在时间上完全重叠。为确定信号脉冲是否真正是由连续波演化所至，在测量过程中曾关掉信号源 λ_s ，此时从示波器上观察到信号脉冲随之消失，而且整个背景向下移动，这说明泵浦脉冲已完全被滤掉，先前所观察到的信号脉冲确实是由于交叉相位调制和群速度色散共同作用

于连续波上的结果。在图 3(b)、图 3(c) 两种情况下产生的信号脉冲为亮脉冲, 表明 $\lambda_s > \lambda_0$; 在图 3(e)、图 3(f) 两种情况下产生的是暗脉冲, 表明 $\lambda_s < \lambda_0$; 而在图 3(d) 情况中, 信号功率起伏很小, 表明信号基本上不受群速度色散的影响, 因而有 $\lambda_s \approx \lambda_0$ 。

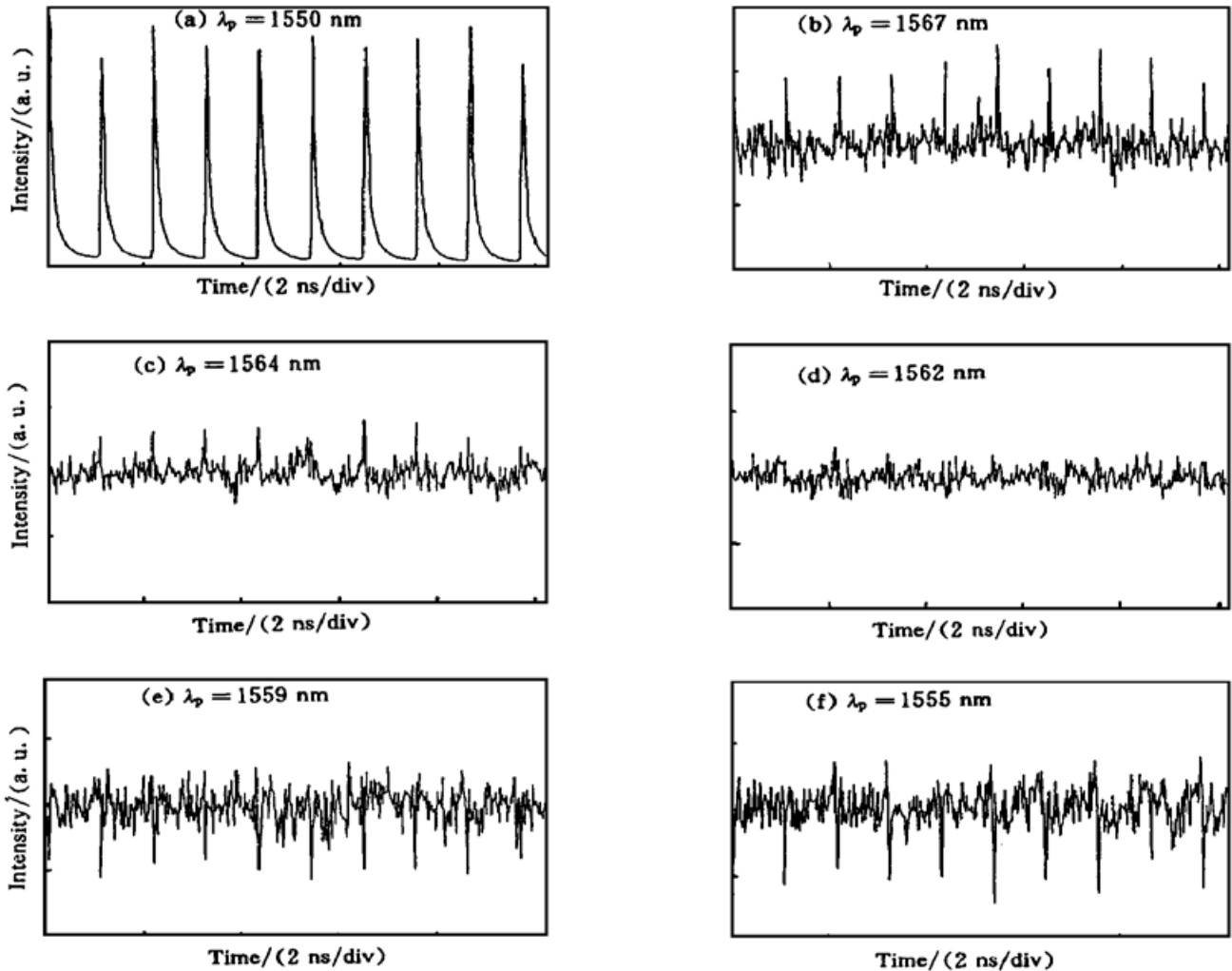


Fig. 3 (a) Waveform of the incident pump pulse with wavelength $\lambda_p = 1550$ nm. (b) ~ (f) Waveforms of the output signals with wavelengths λ of 1567, 1564, 1562, 1559, 1555 nm, respectively

图 4 是在 $\lambda_s = 1555 \sim 1567$ nm 范围内每隔 0.5 nm 对 λ_s 进行调谐所测得的信号脉冲归一化峰值强度(用图中 * 表示的强度进行归一化) 与 λ_s 的关系。这里的每一个强度值(以圆圈表示) 是通过对示波器上同时观察到的(即同一幅图形中的) 相邻 10 个脉冲的归一化峰值强度加以平均所得。图中 * 表示关掉泵浦脉冲后所观察到的信号波强度。从图 4 可清晰地判断出被测光纤的零色散波长 λ_0 在 1561.5 nm 附近。

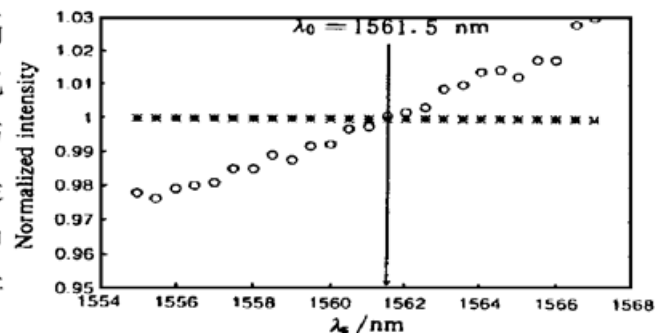


Fig. 4 The relation of the normalized peak intensity of the output signal (circle) to the signal wavelength λ_s . “*” represents the intensity of the output signal when the pump is turned off

5 被测光纤的有效长度范围及测量精度

由图 1(b) 及图 1(c) 可知, 对于给定的泵浦脉冲与信号波, 只能在一定的传输距离范围内

才可以有效地产生信号脉冲(亮脉冲或暗脉冲)。这表明,在泵浦脉冲与信号波给定的情况下,用前述方法测量光纤 λ_0 值时,被测光纤的长度必须处于某个长度范围内(以下称为有效长度范围)。由于这里的泵浦脉冲峰值功率远高于信号波功率,因此由(5)式知,对于信号波来说交叉相位调制效应相对于自相位调制效应起主要作用,即信号脉冲的产生与演化主要与泵浦脉冲有关。因而被测光纤的有效长度范围及测量精度主要由泵浦脉冲决定,即决定于泵浦脉冲的初始宽度和初始峰值功率。

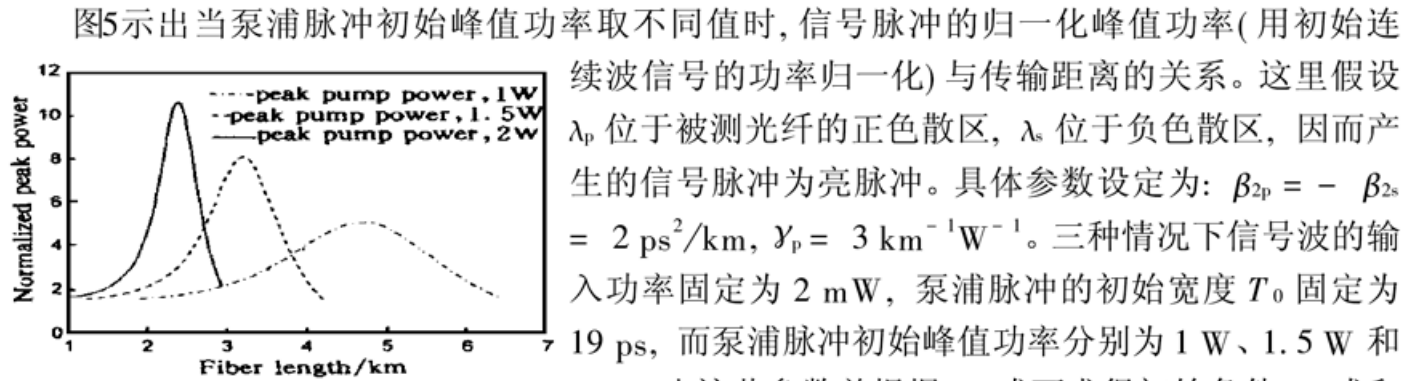


Fig. 5 The relation of the normalized peak power of the signal pulse to the propagation distance for several values of the incident pump peak power. The pump and the signal wavelengths, the initial pump pulse width, and the initial signal power remain unchanged in all cases

图5示出当泵浦脉冲初始峰值功率取不同值时,信号脉冲的归一化峰值功率(用初始连续波信号的功率归一化)与传输距离的关系。这里假设 λ_p 位于被测光纤的正色散区, λ_s 位于负色散区,因而产生的信号脉冲为亮脉冲。具体参数设定为: $\beta_{2p} = -\beta_{2s} = 2 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma_p = 3 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$ 。三种情况下信号波的输入功率固定为 2 mW , 泵浦脉冲的初始宽度 T_0 固定为 19 ps , 而泵浦脉冲初始峰值功率分别为 1 W 、 1.5 W 和 2 W 。由这些参数并根据(3)式可求得初始条件(8)式和(9)式中的 A_1 和 A_2 , 再通过数值求解(4)式和(5)式便可计算出图5中的三条曲线。图5表明:

1) 对于给定的泵浦脉冲,只能在某个有效传输范围内才能产生较强的信号脉冲。例如,当泵浦脉冲初始峰值功率为 1 W 时,有效传输范围约 $3.7 \sim 5.6 \text{ km}$, 在这一范围之外产生的信号脉冲都很弱。这意味着测量光纤 λ_0 时,被测光纤的长度必须处于上述有效范围内。

2) 被测光纤的有效长度范围随泵浦脉冲初始峰值功率的变化而变化。泵浦脉冲初始峰值功率愈高,被测光纤的长度愈短,有效长度范围也愈小。如泵浦脉冲的初始峰值功率为 1.5 W 时,有效长度范围约为 $2.5 \sim 3.9 \text{ km}$, 而初始峰值功率为 2 W 时,有效长度范围约 $1.8 \sim 2.8 \text{ km}$ 。

3) 泵浦脉冲初始峰值功率愈高,在有效长度范围内产生的亮脉冲愈强,表明测量精度随泵浦脉冲初始峰值功率的增大而提高。

图6示出当泵浦脉冲初始峰值功率固定不变(取值 1.5 W), 而泵浦脉冲初始宽度 T_0 分别取值 19 ps 、 30 ps 、及 40 ps 时,信号脉冲的归一化峰值功率与传输距离的关系。三种情况下,输入信号波固定不变(功率为 2 mW), β_{2p} 、 β_{2s} 也与图5中相同。图6表明, T_0 愈大,被测光纤的长度愈长,而有效长度范围则基本相同。与此同时,测量精度则随 T_0 的增大而逐渐下降。这是由于泵浦脉冲愈宽,其能量在传输过程中的损耗也愈大[可从(6)式看出]。因此,测量中所使用的泵浦脉冲不宜太宽,否则测量精度下降。从图(6)还可看出,泵浦脉冲初始宽度也不能太窄,否则可测量的光纤太短。因此,如果泵浦脉冲初始峰值功率在 1.5 W 附近,则初始宽度 T_0 应控制在 $10 \sim 50 \text{ ps}$ 范围内才合适。

图7是在被测光纤长度给定的情况下(光纤长度为 1.7 km), 当泵浦脉冲初始峰值功率取不同值时,通过改变信号波的色散系数 β_{2s} (相当于对信号波长 λ_s 进行调谐)而计算出的光纤输出端信号脉冲的归一化峰值功率。三种情况下,泵浦波长固定不变($\beta_{2p} = 2 \text{ ps}^2/\text{km}$), 泵浦脉宽 T_0 均为 19 ps , 信号波初始功率固定为 2 mW 。图7表明,随着 $|\beta_{2s}|$ 的减小(即 λ_s 逐渐

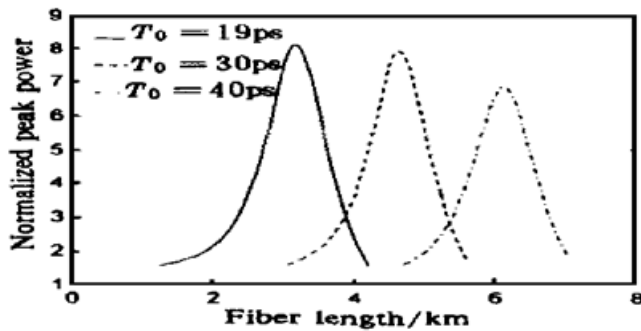


Fig. 6 The relation of the normalized peak power of the signal pulse to the propagation distance for several values of the initial pump pulse width T_0 . The pump and the signal wavelengths, the initial pump peak power, and the initial signal power remain unchanged in all cases

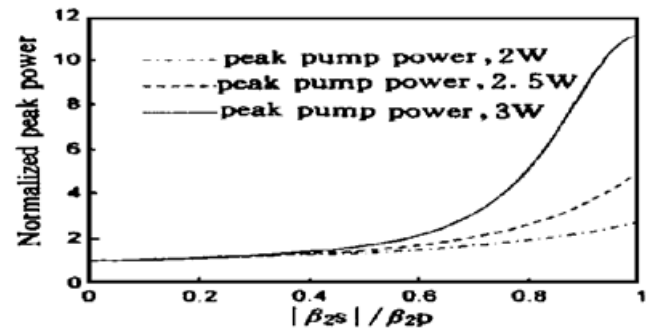


Fig. 7 The relation of the normalized peak power of the signal pulse at the output end of a 1.7 km fiber to the dispersion parameter β_{2s} for several values of the incident pump peak power. The pump wavelength, the initial pump pulse width, and the initial signal power remain unchanged in all cases

向 λ_0 靠近), 光纤输出端亮脉冲的峰值功率逐渐下降, 这与实验中观察到的一致。从图 7 还可看出, 泵浦脉冲初始峰值功率愈高, 在 λ_0 附近产生的亮脉冲愈强, 表明测量精度随泵浦脉冲初始峰值功率的增大而提高。

结 论 本文提出并从实验上验证了一种测量单模光纤零色散波长的新方法。其基本原理是: 让波长可调谐的连续信号波和波长位于光纤正常色散区的泵浦脉冲串在光纤中共同传输, 利用交叉相位调制与群速度色散的相互作用对信号波的强度进行调制, 通过观察被调制后的信号波的正负特性及调制程度便可直接判断出被测光纤的零色散波长。计算结果表明, 对于给定的泵浦脉冲和信号波, 为了保证一定的测量精度, 被测光纤的长度必须处于一定的有效长度范围内。泵浦脉冲初始峰值功率愈高, 测量精度则愈高, 但被测光纤的长度及有效长度范围愈小。泵浦脉冲初始宽度愈大, 可测量的光纤愈长, 但测量精度随之下降。因此, 在有限的泵浦功率情况下, 泵浦脉冲初始宽度应控制在合适的范围内。实验中利用这一方法对长度为 0.98 km 的色散位移光纤的零色散波长进行了测量, 测量精度可达 0.5 nm。

参 考 文 献

- [1] Shapiro E G, Turitsyn S K. Theory of guiding-center breathing soliton propagation in optical communication systems with strong dispersion management. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1544~ 1546
- [2] Byron K C, Bedgood M A, Finney A *et al.*. Shifts in zero dispersion wavelength due to pressure, temperature and strain in dispersion shifted single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(18): 1712~ 1714
- [3] Cohen L G, Lin C. Pulse delay measurements in the zero material dispersion wavelength region for optical fibers. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(12): 3136~ 3139
- [4] Costa B, Mazzoni D, Puleo M *et al.*. Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1509~ 1515
- [5] Stone J, Marcuse D. Direct measurement of second-order dispersion in short optical fibers using white-light interferometry. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(18): 751~ 752
- [6] Hussey C D. Field to dispersion relationships in single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(25/26): 1051~ 1052

- [7] Nishi S, Saruwatari M. Technique for measuring the distributed zero dispersion wavelength of optical fibers using pulse amplification caused by modulation instability. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(3) : 225~ 226
- [8] Murakami M, Amemiya M. Simple and accurate zero dispersion wavelength measurement for long haul optical amplifier systems using induced phase to amplitude modulation conversion. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(8) : 666~ 668
- [9] Tomizawa M. Measurement of local zero-dispersion wavelength at the input-side of dispersion managed optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8) : 1565~ 1572
- [10] Suetsugu Y, Kato T, Okuno T *et al.*. Measurement of zero-dispersion wavelength variation in concatenated dispersion-shifted fibers by improved four-wave-mixing technique. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(12) : 1459~ 1461
- [11] Eiselt M, Jopson R M, Stolen R H. Nondestructive position-resolved measurement of the zero-dispersion wavelength in an optical fiber. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(1) : 135~ 143
- [12] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. 2nd ed. Academic, Boston, Mass., 1995, Chap. 7
- [13] Cao Wenhua, Zhang Youwei. The effect of pulse walkoff on the compression of bright optical pulses by dark solitons. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(1~ 3) : 23~ 29
- [14] 曹文华, 张有为, 刘颂豪等. 光纤中基于交叉相位调制与喇曼放大的超短光脉冲串的产生. 电子学报, 1998, **26**(5) : 34~ 37
- [15] 曹文华, 张有为, 刘颂豪等. 光纤正常色散区基于脉冲对交叉相位调制的亮脉冲压缩. 物理学报, 1997, **46**(5) : 919~ 928
- [16] Cao Wenhua, Li Shenping, Chan Kam-tai. Generation of dark pulse trains from cw light using cross-phase modulation in optical fibers. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(4) : 510~ 512

Accurate Measurement of Zero-Dispersion Wavelength in an Optical Fiber

Cao Wenhua^{1), 2)} Li Shenping¹⁾ Chan Kam-tai¹⁾ Liu Songhao³⁾
 [1), *Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong*
 2), *Department of Electronic and Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020*
 3), *Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631*]

(Received 6 August 1998; revised 23 November 1998)

Abstract A novel method which can directly measure the zero-dispersion wavelength of a single-mode fiber is presented. It consists of copropagating a train of pump pulse with a cw light in an optical fiber. The pump wavelength is located at the normal-dispersion regime of the fiber while the cw wavelength is tunable. The interplay between cross-phase modulation and group-velocity dispersion results in intensity modulation on the cw light which can evolve into a train of bright or dark pulses depending on whether its wavelength is tuned into the anomalous- or normal-dispersion regime of the fiber. If neither bright nor dark pulses are generated, then the cw wavelength must be near the zero-dispersion wavelength of the fiber. By using this simple method, the zero-dispersion wavelength of a 0.98 km dispersion-shifted fiber have successfully been measured with a wavelength accuracy of ~ 0.5 nm.

Key words zero-dispersion wavelength, group-velocity dispersion, cross-phase modulation, bright pulses, dark pulses.