

# 非线性单模光纤中的调制不稳定性

赵 阳 杨祥林

(东南大学电子学系)

1988年9月5日收到

本文对非线性单模光纤中的调制不稳定性进行了详细研究,给出了调制不稳定性产生的条件与最大调制增长率等公式,得到了调制不稳定性既可在异常色散区又可在正常色散区产生的结论,确定了维持调制增长对光纤长度选取要求的范围。

## 一、引 言

光纤非线性效应(折射率随光强变化而变化,即克尔效应)与光纤色散的相互作用不仅导致异常色散区孤子的形成<sup>[1-3]</sup>,而且导致另一种非线性现象——调制不稳定性的产生<sup>[4]</sup>。后者与前者一样,也已经被实验证实其在非线性单模光纤中存在<sup>[5]</sup>。

所谓调制不稳定性就是连续波通过非线性、色散介质产生幅值与频率的自调制,并具有指数增长的一种非线性过程。这一非线性过程在光器件中的潜在应用是可能产生一种新型的频率变换器件——光纤可调相干红外光源<sup>[6]</sup>。从光通信角度来说,调制不稳定性可能是幅度调制或相位调制相干通信系统的一种限制因素<sup>[7,8]</sup>。因此对这一非线性现象的研究,无论是对光通信器件还是对系统来说,都具有重要意义。

文献[9]研究了理想无损耗情况下,非线性项的时间变化对调制不稳定性的影响。文献[10]同样在理想无损耗情况下研究了高阶色散下的调制不稳定性。本文对损耗、高阶非线性、高阶色散、非线性项的时间变化并存的单模光纤中的调制不稳定性进行了详细研究,给出了调制不稳定性产生的条件与最大调制增长率等公式,得到了调制不稳定性可在正常色散区产生的重要结论,确定了维持调制增长对光纤长度选取要求的范围。本文的分析不是采用以前文献所用的对稳态波幅值的扰动方法,而是采用对整个稳态波的扰动,显然更合乎物理实际。

## 二、调制色散关系

当光纤工作在非线性状态时,考虑高阶非线性,纤芯介质折射率为<sup>[11]</sup>

$$n = n_0(\omega) + i\chi + n_2|E|^2 + n_4|E|^4. \quad (1)$$

式中

$$E = \text{Re}\{\phi(z, t)R(r, \theta)e^{i(k_0 z - \omega_0 t)}\} \quad (2)$$

为光纤中传输的调制波,  $k_0$  与  $\omega_0$  分别为载波波数与频率,  $R(r, \theta)$  为调制波的径向本征

模式,  $\phi(z, t)$  为调制包络,  $n_0(\omega)$  为折射率的线性部分,  $\chi$  为介质损耗,  $n_2, n_4$  分别为三阶和五阶非线性系数. 按照平均方法<sup>[12]</sup>, 考虑高阶色散与三阶非线性的时间变化, 包络传输方程表为

$$i \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + \gamma \phi + k'_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \alpha \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - i\beta \frac{\partial^3 \phi}{\partial t^3} + a|\phi|^2 \phi - b|\phi|^4 \phi + ig \frac{\partial}{\partial t} (|\phi|^2 \phi) = 0. \quad (3)$$

式中  $\alpha = -\frac{1}{2} k''_0$ ,  $\beta = \frac{1}{6} k'''_0$ ,  $a = \omega_0 n_2 / 2c$ ,  $b = \omega_0 n_4 / 2c$ ,  $g = n_2 / 2c$ ,  $k'_0 = \partial k / \partial \omega|_{\omega=\omega_0}$  为群速的倒数,  $k''_0 = \partial^2 k / \partial \omega^2|_{\omega=\omega_0}$  为光纤色散,  $k'''_0 = \partial^3 k / \partial \omega^3|_{\omega=\omega_0}$  为三阶色散,  $c$  为真空中的光速,  $\gamma = \omega_0 \chi / c$  为光纤损耗.

令  $T = t - k'_0 z$ , 并做变换

$$\phi = e^{-\gamma z} \psi(z, T), \quad (4)$$

则方程 (3) 变为

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} + \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} - i\beta \frac{\partial^3 \psi}{\partial T^3} + a e^{-2\gamma z} |\psi|^2 \psi - b e^{-4\gamma z} |\psi|^4 \psi + i g e^{-2\gamma z} \frac{\partial}{\partial T} (|\psi|^2 \psi) = 0. \quad (5)$$

对于调制不稳定性, 设初始注入为连续波, 我们将方程 (5) 的解表为稳态波的扰动形式

$$\psi = \psi_0(z) + \varepsilon H(z, T). \quad (6)$$

式中  $\psi_0(z)$  为稳态波解,  $H$  为稳态波的慢变包络调制所引起的稳态解的扰动,  $\varepsilon$  为表征扰动程度的参数. 将 (6) 式代入 (5) 式, 得到

$$i \frac{\partial \psi_0}{\partial z} + a e^{-2\gamma z} |\psi_0|^2 \psi_0 - b e^{-4\gamma z} |\psi_0|^4 \psi_0 = 0, \quad (7a)$$

$$i \frac{\partial H}{\partial z} + \alpha \frac{\partial^2 H}{\partial T^2} - i\beta \frac{\partial^3 H}{\partial T^3} + a e^{-2\gamma z} (2|\psi_0|^2 H + \psi_0^2 H^*) - b e^{-4\gamma z} \times (3|\psi_0|^4 H + 2|\psi_0|^2 \psi_0^2 H^*) + i g e^{-2\gamma z} \frac{\partial}{\partial T} (2|\psi_0|^2 H + \psi_0^2 H^*) = 0. \quad (7b)$$

(7b) 式中  $H^*$  为  $H$  的复数共扼.

令  $\psi_0(z) = \varphi_0 \exp[iA(z)z]$ , 由 (7a) 式立即可得稳态波解为

$$\psi_0(z) = \varphi_0 \exp \left[ -i \left( a - \frac{1}{2} b \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} / 2\gamma \right]. \quad (8)$$

将  $H$  表为  $H = u(z, T) + i v(z, T)$ , 代入 (7b) 式, 并注意到 (8) 式, 得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial z} + \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} - \beta \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} + a \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} [2v + (u \sin \theta - v \cos \theta)] - b e^{-4\gamma z} \varphi_0^4 \\ & \times [3v + 2(u \sin \theta - v \cos \theta)] + g e^{-2\gamma z} \varphi_0^2 \frac{\partial}{\partial T} [2u + (u \cos \theta + v \sin \theta)] = 0, \\ & - \frac{\partial v}{\partial z} + \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + \beta \frac{\partial^3 v}{\partial T^3} + a \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} [2u + (u \cos \theta + v \sin \theta)] - b e^{-4\gamma z} \varphi_0^4 \end{aligned}$$

$$\times [3u + 2(u \cos \theta + v \sin \theta)] - g e^{-2\gamma z} \varphi_0^2 \frac{\partial}{\partial T} [2v + (u \sin \theta - v \cos \theta)] = 0. \quad (9)$$

式中

$$\theta = - \left( a - \frac{1}{2} b \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} / \gamma.$$

考虑解

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} e^{i(Kz - \Omega T)}. \quad (10)$$

式中  $K$  与  $\Omega$  分别为调制波数与调制频率, 代入 (9) 式, 可得

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} = 0. \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} a_{11} &= (a - 2b\varphi_0^2 e^{-2\gamma z})\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \sin \theta + i[K - \beta\Omega^2 - (2 + \cos \theta)g\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}\Omega], \\ a_{12} &= -\alpha\Omega^2 + [(2 - \cos \theta)a - (3 - 2\cos \theta)b\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}]\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} - ig\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}\Omega \sin \theta, \\ a_{21} &= -\alpha\Omega^2 + [(2 + \cos \theta)a - (3 + 2\cos \theta)b\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}]\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} + ig\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}\Omega \sin \theta, \\ a_{22} &= (a - 2b\varphi_0^2 e^{-2\gamma z})\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \sin \theta + i[-K + \beta\Omega^2 + (2 - \cos \theta)g\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}\Omega]. \end{aligned}$$

由上式有解的条件系数行列式等于零, 得到调制色散关系为

$$\begin{aligned} K^2 - 2\Omega(\beta\Omega^2 + 2g\varphi_0^2 e^{-2\gamma z})K + 4(\beta g\Omega^2 + \alpha a)\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}\Omega^2 \\ + 3(g^2\Omega^2 - 2\alpha b\Omega^2 - a^2)\varphi_0^4 e^{-4\gamma z} + 8ab\varphi_0^6 e^{-6\gamma z} - 5b^2\varphi_0^8 e^{-8\gamma z} \\ + (\beta^2\Omega^2 - \alpha^2)\Omega^4 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

### 三、调制不稳定性产生的条件

调制色散关系 (12) 式给出

$$\begin{aligned} K &= (\beta\Omega^2 + 2g\varphi_0^2 e^{-2\gamma z})\Omega \pm i\{4a(\alpha\Omega^2 + 2b\varphi_0^4 e^{-4\gamma z})\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \\ &\quad - [(g^2 + 6\alpha b)\Omega^2 + (3a^2 + 5b^2\varphi_0^4 e^{-4\gamma z})]\varphi_0^4 e^{-4\gamma z} - \alpha^2\Omega^4\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (13)$$

上式中  $\text{Re}K$  给出振荡不稳定性,  $\text{Im}K$  给出调制不稳定性. 显见, 振荡不稳定性由高阶色散决定, 它对调制不稳定性没有贡献, 而调制不稳定性由光纤色散、三阶非线性与五阶非线性决定, 三阶非线性的时间变化对振荡不稳定和调制不稳定均有贡献. 显然要使调制不稳定性产生, 必须  $|\text{Im}K|^2 > 0$ , 即

$$\begin{aligned} \alpha^2\Omega^4 + (g^2\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} + 6b\alpha\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} - 4a\alpha)\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}\Omega^2 + (3a^2 \\ + 5b^2\varphi_0^4 e^{-4\gamma z} - 8ab\varphi_0^2 e^{-2\gamma z})\varphi_0^4 e^{-4\gamma z} < 0. \end{aligned} \quad (14)$$

由此可知, 只有当下式

$$3a^2 + 5b^2\varphi_0^4 e^{-4\gamma z} > 8ab\varphi_0^2 e^{-2\gamma z}, \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\alpha} (g^2\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} + 6b\alpha\varphi_0^2 e^{-2\gamma z} - 4a\alpha) < -(3a^2 + 5b^2\varphi_0^4 e^{-4\gamma z} \\ - 8ab\varphi_0^2 e^{-2\gamma z})^{1/2} \end{aligned} \quad (15b)$$

成立时, 调制不稳定性才在频域

$$\left[ -\left(\frac{A^2}{4} - B\right)^{1/2} - \frac{A}{2} \right]^{1/2} < Q_1 < \left[ \left(\frac{A^2}{4} - B\right)^{1/2} - \frac{A}{2} \right]^{1/2}, \quad (16a)$$

$$-\left[ \left(\frac{A^2}{4} - B\right)^{1/2} - \frac{A}{2} \right]^{1/2} < Q_2 < -\left[ -\left(\frac{A^2}{4} - B\right)^{1/2} - \frac{A}{2} \right]^{1/2} \quad (16b)$$

中产生. 式中

$$A = \frac{1}{\alpha^2} (g^2 \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} + 6b\alpha \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} - 4a\alpha) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z},$$

$$B = \frac{1}{\alpha^2} (3a^2 + 5b^2 \varphi_0^4 e^{-4\gamma z} - 8ab \varphi_0^2 e^{-2\gamma z}) \varphi_0^4 e^{-4\gamma z}.$$

(16b) 式表示的为负频率域, 显然正频率域与负频率域关于  $\omega_0$  对称.

由 (15) 式, 并注意到  $\alpha, a, b, g$  的表示, 得到调制不稳定性产生的条件为

$$\frac{n_4}{n_2} \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} > 1, \quad (17a, a)$$

$$\frac{1}{k_0'} > \frac{2c\omega_0}{n_2 \varphi_0^2 e^{-2\gamma z}} \left[ \left( 3 + 5 \left( \frac{n_4}{n_2} \right)^2 \varphi_0^4 e^{-4\gamma z} - 8 \left( \frac{n_4}{n_2} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \right)^{1/2} + \left( 3 \left( \frac{n_4}{n_2} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} - 2 \right) \right] \quad (17a, b)$$

或

$$\frac{n_4}{n_2} \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} < 3/5, \quad (17b, a)$$

$$\frac{1}{k_0'} > \frac{2c\omega_0}{n_2 \varphi_0^2 e^{-2\gamma z}} \left[ \left( 3 + 5 \left( \frac{n_4}{n_2} \right)^2 \varphi_0^4 e^{-4\gamma z} - 8 \left( \frac{n_4}{n_2} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \right)^{1/2} - \left( 3 \left( \frac{n_4}{n_2} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} - 2 \right) \right]. \quad (17b, b)$$

在 (17a, a) 式的条件下, 由于  $3 n_4 \varphi_0^2 \exp(-2\gamma z)/n_2 - 2 > 0$ , (17a, b) 式右边为正值, 因此调制不稳定性在正常色散区产生.

在 (17b, a) 式的条件下, 由于  $3 n_4 \varphi_0^2 \exp(-2\gamma z)/n_2 - 2 < 0$ , 且在  $n_4 \varphi_0^2 \exp(-2\gamma z)/n_2 \approx 1/2$  时, 总有

$$\left| 3 \left( \frac{n_4}{n_2} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} - 2 \right| > \left( 3 + 5 \left( \frac{n_4}{n_2} \right)^2 \varphi_0^4 e^{-4\gamma z} - 8 \left( \frac{n_4}{n_2} \right) \varphi_0^2 e^{-2\gamma z} \right)^{1/2}$$

成立, 所以 (17b, b) 式的右边为负值, 因此调制不稳定性既可在正常色散区又可在异常色散区产生.

当  $n_4 \varphi_0^2 \exp(-2\gamma z)/n_2 = \frac{1}{2}$  时, (17b, b) 式右边等于零, 此时调制不稳定性只在正常色散区产生. 当然  $n_4 \varphi_0^2 \exp(-2\gamma z)/n_2 = \frac{1}{2}$  这个条件在实际光纤设计中是难以达到的.

从 (17) 式可以清楚地看出, 调制不稳定性产生的条件完全取决于五阶非线性和三阶非线性及初始注入 CW 波的幅值.

当忽略五阶非线性与三阶非线性的时间变化, 并不考虑高阶色散及光纤损耗, 即令  $\beta, b, g, \gamma$  均等于零时, (13) 式变为

$$K^2 = \alpha^2 \left( Q^2 - \frac{2a}{\alpha} \varphi_0^2 \right)^2 - a^2 \varphi_0^4. \quad (18)$$

由  $K^2 < 0$ , 立即可得调制不稳定性产生的条件

$$\frac{a}{\alpha} > 0. \quad (19)$$

由于  $a > 0 (n_2 > 0)$ , 所以必有  $\alpha > 0$ , 即  $K'' < 0$ , 因此理想非线性光纤系统中调制不稳定性只在异常色散区产生, 同时此种情况为纯粹的调制不稳定, 这正是文献 [4, 6] 的结果.

当考虑三阶非线性的时间变化对理想非线性光纤系统的影响, 即令  $\beta, b, r = 0$ ,  $g \neq 0$  时, (13) 式变为

$$K = 2g\varphi_0^2 Q \pm i \{ [(4a\alpha - g^2\varphi_0^2)\varphi_0^2 - \alpha^2 Q^2] Q^2 - 3a^2\varphi_0^4 \}^{1/2}. \quad (20)$$

由  $|\text{Im}K| > 0$ , 可得

$$\frac{a}{\alpha} > \frac{1}{2} \left( \sqrt{3a} + \frac{g^2}{2\alpha^2} \varphi_0^2 \right). \quad (21)$$

同理由于  $a > 0$ , 因此上式成立必要求  $\alpha > 0$ , 即  $K'' < 0$ , 所以调制不稳定性也只在异常色散区产生, 只不过此种情况伴随有三阶非线性的时间变化产生的振荡不稳定性, 同时, 调制不稳定性产生的条件强于理想非线性光纤系统的情况, 这与文献 [9] 的结果相符.

当  $b, r = 0, \beta, g \neq 0$  时, (13) 式变为

$$K = (\beta Q^2 + 2g\varphi_0^2) Q \pm i \{ [(4a\alpha - g^2\varphi_0^2)\varphi_0^2 - \alpha^2 Q^2] Q^2 - 3a^2\varphi_0^4 \}^{1/2}. \quad (22)$$

显然此种情况调制不稳定性产生的条件与 (21) 式相同, 三阶色散与调制不稳定性无关, 它只对振荡不稳定性有贡献, 这正是文献 [10] 的结论.

将 (17) 式与 (19) 和 (20) 式比较, 可以看出, 五阶非线性的存在使调制不稳定的产生条件起了重要变化.

#### 四、最大调制增长

由 (13) 式, 根据  $\partial|\text{Im}K|/\partial Q = 0$ , 得到最大调制增长率与最大调制增长频率为

$$|\text{Im}K|_{\max} = \left[ a^2 - 2a \left( \frac{g^2}{\alpha} + 2b \right) \varphi_0^2 e^{-2\tau z} + (4b^2 + 3bg^2/\alpha + g^4/4\alpha^2) \varphi_0^4 e^{-4\tau z} \right]^{1/2} \varphi_0^2 e^{-2\tau z} \quad (23a)$$

$$Q_m = \pm \left( \frac{2a}{\alpha} - \frac{g^2 + 6b\alpha}{2\alpha^2} \varphi_0^2 e^{-2\tau z} \right)^{1/2} \varphi_0 e^{-\tau z}. \quad (23b)$$

由 (23b) 式可以看出, 在异常色散区, 五阶非线性与三阶非线性的时间变化导致最大调制增长频率降低. 这意味着, 若利用调制不稳定性做成光纤可调相干红外光源, 则光源的可调范围减小; 而在正常色散区, 正是由于五阶非线性才使得最大调制增长率存在.

对于理想非线性光纤系统, (23) 式退化为文献 [4] 的结果

$$|\text{Im}K|_{\max} = a\varphi_0^2, \quad (24a)$$

$$Q_m = \pm \left( \frac{2a}{\alpha} \right)^{1/2} \varphi_0. \quad (24b)$$

对于考虑三阶非线性的时间变化的非线性光纤系统, (23) 式变为

$$|\text{Im}K|_{\max} = \left[ \left( a - \frac{g^2}{\alpha} \varphi_0^2 \right)^2 - \frac{3g^4}{4\alpha^2} \varphi_0^4 \right]^{1/2} \varphi_0^2, \quad (25a)$$

$$Q_m = \pm \left( \frac{2a}{\alpha} - \frac{g^2}{2\alpha^2} \varphi_0^2 \right)^{1/2} \varphi_0. \quad (25b)$$

这与文献[9]的结果相符。

特例(24)和(25)式与光纤损耗无关, 这意味着无限长的光纤可以获得无限大的增益, 显然是不符合实际情况的。事实上, 从(13)和(23)式可见, 对于给定的光纤, 由于光纤损耗导致连续波幅值的衰减, 从而调制增长率与调制增长频率均随光纤长度的增长而减小, 因此在非损耗补偿光纤系统中, 要维持调制增长的存在, 对于给定的光纤, 光纤传输长度必存在一个极限值  $z_{\max}$ , 在最大调制增长频率  $Q_m(z_{\max})$  处, 满足  $|\text{Im}K|_{\max} \times (z_{\max}) - \gamma = 0$ , 即

$$\left( 4b^2 + \frac{3bg^2}{\alpha} + \frac{g^4}{4\alpha^2} \right) x^4 - 2a \left( \frac{g^2}{\alpha} + 2b \right) x^3 + a^2 x^2 - \gamma^2 = 0. \quad (26)$$

式中  $x$  满足

$$z_{\max} = \frac{1}{2\gamma} (2 \ln \varphi_0 - \ln x). \quad (27)$$

因此, 在调制不稳定性的产生条件(17a)式的约束下, 维持调制增长的光纤长度  $z$  应取

$$0 < z < z_{\max}. \quad (28)$$

式中  $z_{\max}$  应取满足下式

$$z_{\max} < \frac{1}{2\gamma} \ln \left( \frac{n_4}{n_2} \varphi_0^2 \right) \quad (29)$$

的方程(26)的解。

在(17b)式的约束下,  $z$  应取

$$\frac{1}{2\gamma} \ln \left( \frac{5}{3} \frac{n_4}{n_2} \varphi_0^2 \right) < z < z_{\max}. \quad (30)$$

在分布损耗补偿的光纤系统中, 外补偿增益抵消了光纤损耗, 调制增长率与调制增长频率近似为常数, 因此在这种系统中, 可以采用足够长的光纤来获取足够大的增益。

## 五、结 论

本文采用对稳态波的扰动方法研究了损耗、高阶非线性、高阶色散、非线性的时间变化并存的单模光纤中的调制不稳定性, 给出了调制不稳定性产生的条件与最大调制增长率等公式。从文中讨论, 可得如下结论:

1. 高阶非线性使得调制不稳定性既可在异常色散区产生, 又可在正常色散区产生。
2. 在异常色散区, 高阶非线性与三阶非线性的时间变化使得最大调制增长频率降低。
3. 由于光纤损耗的存在, 要维持调制增长, 光纤长度选取不能超过最大值  $z_{\max}$ 。

- [ 1 ] A. Hasegawa and F. Tappert, *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973), 142.
- [ 2 ] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen and J. P. Gordon, *Phys. Rev. Lett.*, **45**(1980), 1095.
- [ 3 ] A. Hasegawa and Y. Koclama, *Proc. IEEE*, **69**(1981), 1145.
- [ 4 ] V. I. Karpman and E. M. Krushkal, *Sov. Phys. JETP*, **28**(1969), 277.
- [ 5 ] K. Tai, A. Tomita and A. Hasegawa, *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 135.
- [ 6 ] A. Hasegawa and W. F. Brinkman, *IEEE J. Quan. Elec.*, **QE-16** (1980), 694.
- [ 7 ] D. Anderson and M. Lisak, *Opt. Lett.*, **9**(1984), 468.
- [ 8 ] B. Hermanson and D. Yevick, *Opt. Commun.*, **52**(1984), 99.
- [ 9 ] P. K. Shukla and J. J. Rasmussen, *Opt. Lett.*, **11** (1986), 171.
- [ 10 ] M. J. Potasek, *Opt. Lett.*, **12**(1987), 921.
- [ 11 ] A. Kumar, S. N. Sarkar and A. K. Ghatak, *Opt. Lett.*, **11**(1986), 321.
- [ 12 ] K. J. Blow and N. J. Doran, *Opt. Commun.*, **48**(1983), 181.

## MODULATION INSTABILITY IN NONLINEAR MONOMODE OPTICAL FIBERS

ZHAO YANG    YANG XIANG-LIN

(Department of Radio-Electronics, Southeast University, Nanjing)

### ABSTRACT

Modulation instability in nonlinear monomode optical fibers is studied in detail. The condition of producing modulation instability and the maximum modulational growth rate as well as other formulas about modulation instability are presented. We obtain the conclusion that modulation instability can be produced not only in the region of anomalous dispersion but also in the region of normal dispersion. We determined the appropriate range of fiber length for maintaining the modulational growth.