

传输线技术

单模光纤译丛

(1)

电子工业部第二三研究所

一九八三年九月

目 录

双包层单模光纤中的信息传输·····	1-1~
单模光纤·····	2-1~
低双折射和高双折射光纤的发展·····	3-1~2
单模光纤光偏振状态的研究·····	4-1~
MCVD 工艺和特性的概况·····	5-1~4
单模光纤接头损耗的精确预测·····	6-1~5
采用纤芯对中套筒的单模光纤连接器·····	7-1~16
单模光纤长距离传输现场试验中使用的光器件·····	8-1~31
可调单模光纤耦合器的分析·····	9-1~20
用偏振光时域反射测量法测量单模光纤的法拉第效应·····	10-1~5
1.3 μm 波长 4 兆比/秒光接收机的灵敏度和单模光纤 长距离传输的特性·····	11-1~2
工作于三十公里单模光纤线路上的 1.5 μm 外差式检测 系统·····	12-1
在单模光纤干涉计中采用聚偏氟乙烯 (PVF ₂) 压电薄 膜的电场传感器·····	13-1
为干涉计声传感器选择最佳的光纤被复层·····	14-1

双包层单模光纤中的信息传输

〔摘要〕

本文用两个参数（内包层与纤芯的直径比以及内包层与纤芯的折射率之差的比）给出了一种双包层单模光纤的一般传输特性和通用曲线。这种光纤内包层的折射率可以比外包层大，也可以比外包层小。文章检查了LP01、LP11和LP02的截止条件。已经证明：这种光纤的色散性能与单包层单模光纤大不相同，从而使我们有很大可能实现1.3至1.7 μm 之间任意波长上的低损耗无色散传输。

I 引 言

本文是根据双包层光纤的计算结果撰写的。我们从实验中发现，LP11模和LP02模的截止性能，并不总是符合单包层光纤弱导理论的预测值和从其它实验（折射率的近场分布和预成形试验）获得的数据之计算值。虽然过去曾发表过内包层折射率小的双包层光纤的理论结果〔1〕—〔3〕，但我们用实验的方法研究了低折射率及高折射率的内包层光纤。然后，我们想把该理论推广到各种双包层光纤中去。我们在计算中取得了某些成果，这使我们更加关心这种结构的色散性能。Kawakami和Nishida〔1〕已经报道了W型光纤异常色散的某些特点，特别是理论上的1 μm 波长无色散的可能性，但这种光纤规格在实际上很难得到。不过，我们在这里证实，W型光纤的另一部分色散曲线可使我们在掺杂程度很低的情况下，实现无色散传输，而这一点与单包层光纤需要高掺杂正好相反。现已证明，为了减少损耗，必须特别注意使光纤设计所需的掺锗量降至最小值〔4〕。这就使我们提出了一种新型的低损耗光纤结构，它在1.3至1.7 μm 之间的任一波长上总色散均为零。

本文的目的在于研究双包层光纤中内包层对基模传输性能——截

止特性、色散特性、归一化传输参数的影响。我们求出了麦克斯韦方程的数值解，求解时不必去设法找出获得这些精确解的解析公式。不过，我们尽量给出某些特解的物理意义，尤其是与单包层光纤情况不同的物理意义。

本文的第二节介绍下述问题的数学表示法：电磁场的解、色散方程及其解。

第三节介绍在某些实际情况下 LP_{01} 、 LP_{11} 和 LP_{02} 模截止条件的研究结果。我们证实，当内包层折射率下凹时用很简单的通用公式就能表示 LP_{01} 模非零截止的条件。

给出各种双包层光纤归一化传输参数 B 的通用曲线在第四节中介绍。从这些数据推导出该光纤 LP_{01} 模的模式色散特性，评价了在 1.3 至 $1.7 \mu m$ 范围内获得低损耗无色散光纤的可能性。

我们研究了图 1 所示的结构：弱导光纤芯径为 $2a$ ，芯线的折射率为 n_1 。内包层的半径为 b ，折射率为 n_2 。周围媒质（外包层）的折射率为 n 。

II. 数值解

我们设（见图 1）：

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

$$\Delta n' = n_2 - n$$

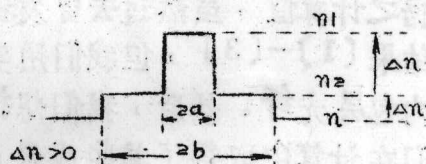
$$V = V_1 = k_0 a (n_1^2 - n^2)^{\frac{1}{2}} \\ = k_0 a [2n(\Delta n + \Delta n')]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_2 = k_0 b (n_2^2 - n^2)^{\frac{1}{2}} \\ = k_0 b (2n \Delta n')^{\frac{1}{2}}$$

式中 k_0 为真空波数。

我们还要引用两个主要参数：

$R = \Delta n' / \Delta n$ 和 $S = b / a$ 。我们将进一步发现，传输性能仅与 R 、 S 及 V 有关。应该指出，数学表示的导波方式取 $R >$



$$S = \frac{b}{a} \quad R = \frac{\Delta n'}{\Delta n} \quad V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{2n(\Delta n + \Delta n')}$$

$\Delta n > 0$

图 1 双包层弱导光纤沿横截面直径方向上的折射率之变化

-1 (传播常数 $\beta > k_0 n$)。本文中我们只取 $\Delta n > 0$; $\Delta n < 0$ 意味着内包层的折射率有凹陷, 而这是与实际光纤不相符的。因此, 这倒不如说是描述纤芯折射率凹陷的单模光纤的, 内包层 ($\Delta n' > 0$) 变成了纤芯。

A 本征场

若 β 为模式传输常数, 则我们定义归一化传输常数 B 为:

$$B = \frac{\beta^2 - k_0^2 n^2}{k_0^2 (n_1^2 - n^2)} = \frac{\beta - k_0 n}{k_0 (\Delta n + \Delta n')} \quad (\text{弱导场合})$$

我们的目的是完成各种 $R (= \Delta n' / \Delta n)$ 和 $S (= b / a)$ 值下的 $B(V)$ 和模式色散参数 $d(VB) / dV$ 和 $V(d^2(VB) / dV^2)$

我们定义模式参数如下:

$$u = a (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$u' = b (k_0^2 n_2^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$v' = b (\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$v = b (\beta^2 - k_0^2 n^2)^{\frac{1}{2}}$$

若设方位角变化的阶数为 m , 则轴向场分量的径向表达式 $\psi(r)$ 为 [5]:

$$\psi = A_0 J_m(u \frac{r}{a}) \quad \dots\dots\dots \text{当 } r \leq a \text{ 时}$$

$$\psi = A_1 J_m(u' \frac{r}{b}) + A_2 Y_m(u' \frac{r}{b}) \quad \dots\dots\dots \text{当 } a \leq r \leq b \text{ 时}$$

(设 $\beta < k_0 n_2$)

$$\psi = A_3 K_m(v \frac{r}{b}) \quad \dots\dots\dots \text{当 } r \geq b \text{ 时} \quad (1)$$

以及:

$$\psi = A_0' J_m(u \frac{r}{a}) \quad \dots\dots\dots \text{当 } r \leq a$$

$$\phi = A_1' I_m(u \frac{r}{b}) + A_2' K_m(v' \frac{r}{b}) \dots \dots \dots \text{当 } a \leq r \leq b \quad (\text{设 } \beta > k_0 n_2)$$

$$\phi = A_3' k_m(u \frac{r}{b}) \dots \dots \dots \text{当 } r \geq b \quad (2)$$

式中 J_m 、 Y_m 、 I_m 和 K_m 为普通贝塞尔函数和修正贝塞尔函数。 A_0 和 A_0' 为归一化系数。 A_1 、 A_2 、 A_3 及 A_1' 、 A_2' 、 A_3' 的解析公式列于附录 I 中。各个场分量通常从 ϕ 推导出来〔5〕。

B 色散方程

使纤芯与内包层及内外包层之间的界面上 ϕ 及 $\delta \phi / \delta r$ 相连续就可求出色散方程。在弱导光纤范围内（相对折射率差均 $\ll 1$ ），这一连续性是与横向场分量的连续性等效的〔6〕。这就得出了一个 (4×4) 矩阵，其行列式必须等于零，以保证非平凡解。

当 $\beta < k_0 n_2$ 时，我们有：

$$\frac{[\hat{J}_m(u) - \hat{Y}_m(u'c)][\hat{K}_m(v) - \hat{J}_m(u')]}{[\hat{J}_m(u) - \hat{J}_m(u'c)][\hat{K}_m(v) - \hat{Y}_m(u')]} = \frac{J_{m+1}(u'c)Y_{m+1}(u')}{J_{m+1}(u')Y_{m+1}(u'c)} \quad (3)$$

当 $\beta > k_0 n_2$ 时，我们有：

$$\frac{[\hat{J}_m(u) - \hat{K}_m(v'c)][\hat{K}_m(v) + \hat{I}_m(v')]}{[\hat{J}_m(u) + \hat{I}_m(v'c)][\hat{K}_m(v) - \hat{K}_m(v)]} = \frac{I_{m+1}(v'c)K_{m+1}(v')}{I_{m+1}(v')K_{m+1}(v'c)} \quad (4)$$

式中

$$\hat{Z}_m(x) = \frac{Z_m(x)}{x Z_{m+1}(x)} \quad (5)$$

(Z 代表贝塞尔函数 J 、 Y 、 I 或 K)， $c = \frac{a}{b} = \frac{1}{s}$

III. 截止频率特性

A 截止频率方程

在截止频率时， $\beta = k_0 n$ ，径向传输常数取下述数值：

$$\begin{aligned} u &= V && \text{当 } r < a \\ u' &= V_2 (\Delta n' > 0), \quad u' = V_2 (\Delta n' < 0) && \text{当 } a < r < b \\ &&& \text{当 } r > b \\ u &= 0 && (6) \end{aligned}$$

接近截止频率时，径向传输常数 u 降至零。通过计算 $u \rightarrow 0$ 时色散方程的极限形式，我们可找出频率截止的条件。我们采用小自变量的 $K_m(u)$ 极限形式⁽⁷⁾

当 $u \rightarrow 0$ ， $K_0(u) \sim -\ln(u)$

$$K_m(u) \sim \frac{2^{m-1} \Gamma(m)}{v^m} \quad (7)$$

1) 当 $\Delta n' > 0$ 时，LP01 模总是可传输的。 $\hat{K}_m(u)$ 与 $1/2m$ ($m \geq 1$) 等效，(3) 式分子中包含 $\hat{K}_m(u)$ 的括号内项变成 $-J_{m-1}(V_2)/2m J_{m+1}(V_2)$ ，分母中的对应项变为 $-Y_{m-1}(V_2)/2m Y_{m+1}(V_2)$ 。从而我们就可得到高次模 ($m \geq 1$) 的截止条件：

$$\frac{\hat{J}_m(V) - \hat{Y}_m(V_2 C)}{\hat{J}_m(V) - \hat{J}_m(V_2 C)} = \frac{J_{m+1}(V_2 C) Y_{m-1}(V_2)}{Y_{m+1}(V_2 C) J_{m-1}(V_2)} \quad (8)$$

2) 当 $\Delta n' < 0$ 时，LP01 模会漏泄掉。 $K_0(u)$ 就与 $-\ln(u)$ 等效，包含 $\hat{K}_m(m)$ 的项将消失。

当 $m \geq 1$ ，它们的分子变为 $I_{m-1}(V_2) / 2m I_{m+1}(V_2)$ ，分母变为 $K_{m-1}(V_2) / 2m K_{m+1}(V_2)$ 。最后，考虑到形式恒等式

$$I_{-1}(x) = I_1(x) \text{ 和 } K_{-1}(x) = K_1(x)$$

则可在 $\Delta n' < 0$ 和其它各种情况 ($m = 0$ 和 $m \geq 1$) 下得到：

$$\frac{\hat{J}_m(V) - \hat{K}_m(V_2 c)}{\hat{J}_m(V) + \hat{f}_m(V_2 c)} = \frac{I_{m+1}(V_2 c) K_{m-1}(V_2)}{K_{m+1}(V_2 c) I_{m-1}(V_2)} \quad (9)$$

B 截止频率曲线

方程(8)和(9)包含 V 、 V_2 及 $V_2 c$ ，因为 $c = \frac{1}{S}$ ， $V_2 = V S (|R| / 1 + R)^{\frac{1}{2}}$ ，所以它们之间的关系可以表达成：

$$V = k_0 a \sqrt{2n(\Delta n + \Delta n')}, R = \Delta n' / \Delta n, S = b / a.$$

若方位角变化的阶数为 m ，归一化截止频率为 V_{cm} ，则可推导出关系式 $f_m(V_{cm}, R, S) = 0$

1) LP01 模：正如 Kawakami 和 Nishida [1] 及 Summunt [3] 已经指出的那样，只要 $\Delta n' < 0$ ，基模就不一定会出现非零截止。为了使场分布得到改善，折射率的凹口必须足够宽 ($\frac{b}{a} \gg 1$ 或 $|\Delta n'| \approx \Delta n$)。图 2 画出了 LP01 模导行区与泄漏区之间的界限，图中坐标分别为 b/a 和 $\Delta n' / \Delta n$ 。该曲线是根据(9)式算出的精确数值解。

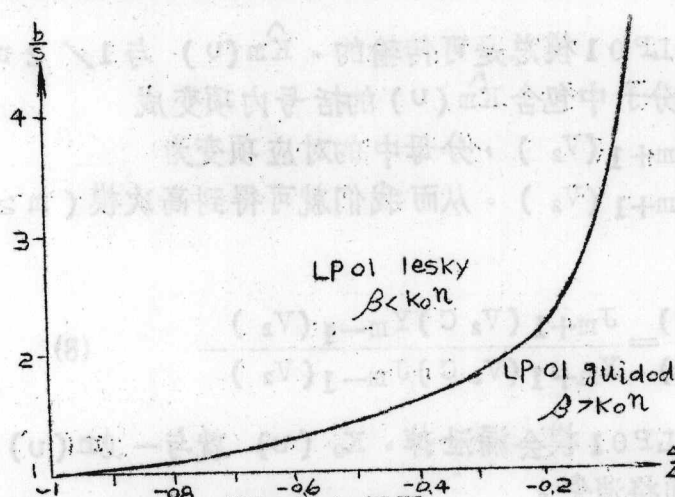


图 2 LP01 模的截止界限

然而，有可能用一种简单的方法找到该曲线的方程。Kawakami 和 Nishida [1] 谈起过这种波在实际上所遇的平均折射率。用稳态公式可使我們定量地表示这一概念，并能有效地导出精确的方程，但我们在这里不这样做，而是作一直接的证明。

我们来看一看在LP01模截止导致 $V=0$ 的条件。从(9)式出发,取 $V \rightarrow 0$ 的极限值,我们有:

$\hat{J}_0(V) \sim 2V^{-2}$, $\hat{K}_0(V_2 c) \sim -\ln(V_2 c)$, $\hat{I}_0(V_2 c) \sim 2(V_2 c)^{-2}$ 右边的项等于 c^2 ,于是可得到:

$$c^2 + \left(\frac{V}{V_2}\right)^2 = 1, \text{ 或 } \frac{b}{a} = \left(\frac{|\Delta n'|}{\Delta n}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

这就是图2曲线的方程。事实上,这是LP01模不截止的条件。但是,如果 V 值不是零,就得不到 V 的截止值。

我们必须很好地理解这里所说的是数学上的截止频率,其定义为 $\beta = k_0 n$ 。显然,只要 b/a 足够大(衰减非常小),则不管 $\Delta n'$ 是多少,LP01模在物理意义上讲总是可以传输的〔2〕。

2) LP01、LP11和LP02模:在图3和图4上可以看到传输基模的截止特性。图3表示截止时的归一化频率 V 的数值 V_0 。(在 b/a 有两种数值时)与 $\Delta n'/\Delta n$ 的函数关系。奇怪的是,如果 b/a 足够大,则在 $\Delta n'/\Delta n$ 为正值的某一范围内LP02模能够传输,而LP11模仍旧泄漏,这一点看来是不难理解的,因为LP02模利用了

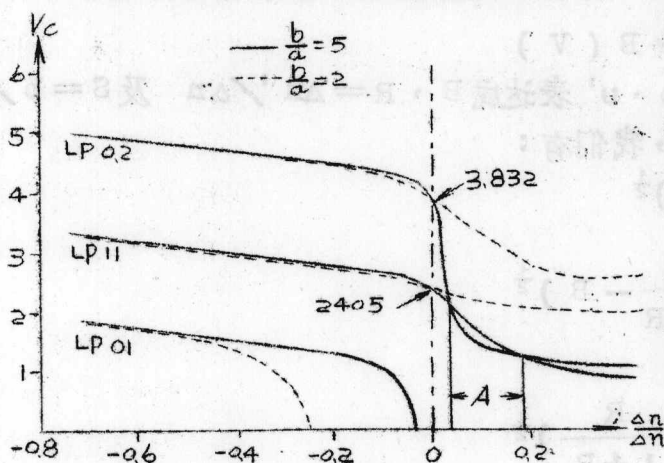


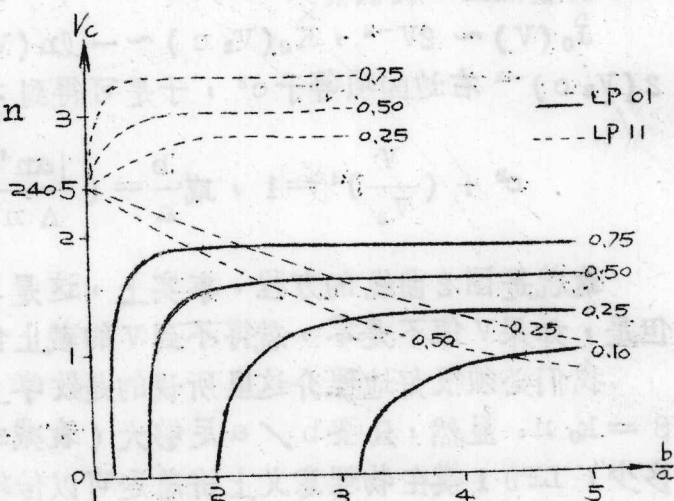
图3 当 $b/a=2$ 及 $b/a=5$ 时,截止的归一化频率 V_0

与 $\frac{|\Delta n'|}{\Delta n}$ 之关系,必须指出:当 $b/a=5$ 时,在区域A内,LP02模可以传输,而LP11模泄漏。

纤芯的折射率差(当 $r=0$ 时场强最大),而LP11模主要受内包层折射率的影响(略高于截止频率时,场的振荡部分扩展到 $r=b$)。

图4表示LP01模和LP11模在各种 $\Delta n'/\Delta n$ 值下 V_c 与 b/a 的关系。

图4 在各种 $\Delta n'/\Delta n$ 值下归一化截止频率 V_c 与 b/a 的关系



IV 归一化传输参数和色散参数

A. 归一化传输常数 $B(V)$

可以把 u, u', v, v' 表达成 $B, R = \Delta n'/\Delta n$ 及 $S = b/a$ 的函数。根据 II-A, 我们有:

$$u = V (1 - B)^{\frac{1}{2}}$$

$$u' = V S \left(\frac{R}{1 + R} - B \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$v' = V S \left(B - \frac{R}{1 + R} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$v = V S / B$$

因此, 可以根据 R 和 S 的给定值计算出 $B(V)$ 。图 5 (a) - (c) 画出了 $B(V)$ 曲线, 它们分别表示 $b/a = 1.5, 2$ 和 5

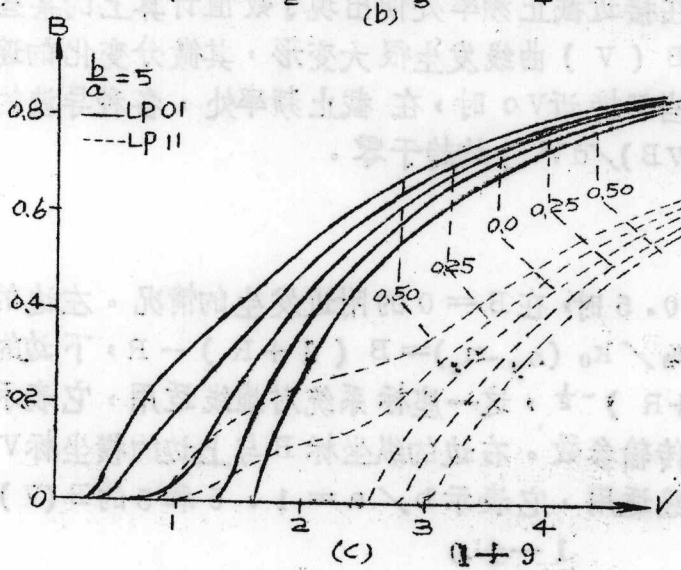
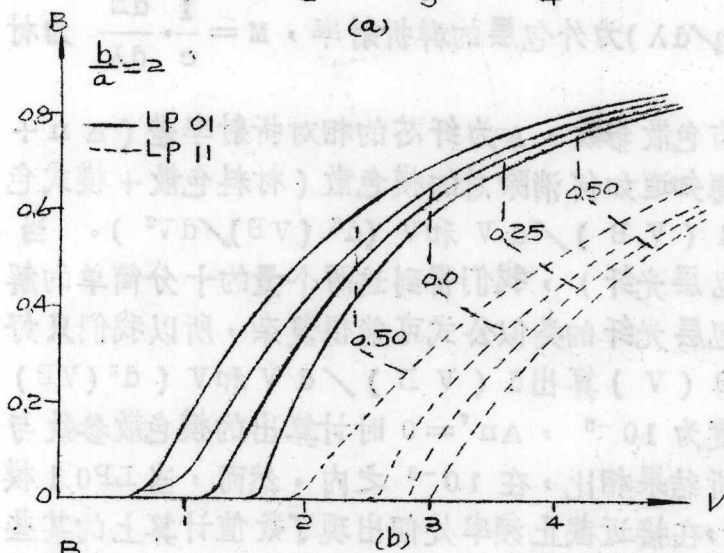
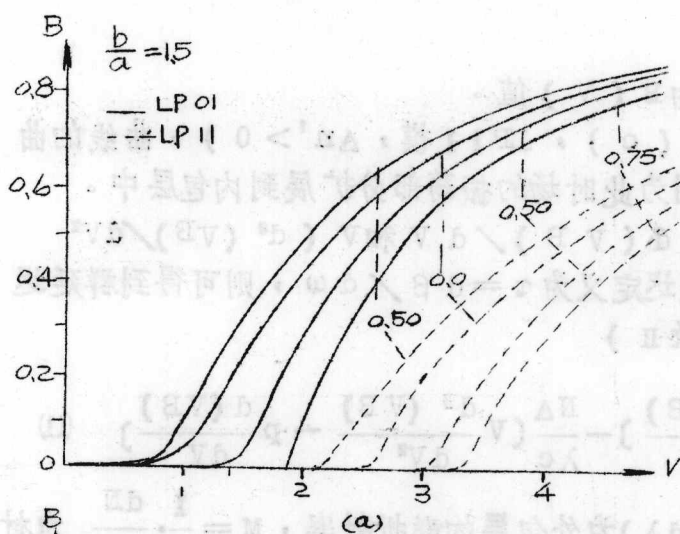


图5 当 $\frac{b}{a} = 1.5$, 2 及 5 时, 在各种 $\frac{\Delta n'}{\Delta n}$ 值下的 $B(V)$ 值

时在各种 $\Delta n' / \Delta n$ 之下的 $B(V)$ 值。

在 $V=3$ 附近 (图 5 (c)), LP11 模, $\Delta n' > 0$), 曲线的曲率符号似乎发生变化, 因为此时场的振荡部分扩展到内包层中。

B 归一化模式色散参数 $d(VB)/dV$ 和 $V(d^2(VB)/dV^2)$

若把 LP01 模的群延迟定义为 $\tau = d\beta/d\omega$, 则可得到群延迟对波长 λ 的微分 (见附录 II)

$$\frac{d\tau}{d\lambda} = M \left(1 + \Delta \frac{d(VB)}{dV} \right) - \frac{N\Delta}{\lambda c} \left(V \frac{d^2(VB)}{dV^2} - p \frac{d(VB)}{dV} \right) \quad (11)$$

上式中 $N = n - \lambda(dn/d\lambda)$ 为外包层的群折射率, $M = \frac{1}{c} \cdot \frac{dN}{d\lambda}$ 为材

料色散, p 为平均分布色散参数, Δ 为纤芯的相对折射率差 $(\Delta n + \Delta n')/n$ 。因此, 若想知道如何消除总的模色散 (材料色散 + 模式色散), 就有必要计算 $d(VB)/dV$ 和 $V(d^2(VB)/dV^2)$ 。当 $\Delta n' / \Delta n = 0$ 时 (单包层光纤), 我们得到这两个量的十分简单的解析公式 [8]。因为双包层光纤的类似公式可能很复杂, 所以我们只好从三个毗邻的 V 值的 $B(V)$ 算出 $d(VB)/dV$ 和 $V(d^2(VB)/dV^2)$ 。B 的相对精度为 10^{-3} , $\Delta n' = 0$ 时计算出的模色散参数与单包层光纤精确的解析结果相比, 在 10^{-3} 之内。然而, 当 LP01 模有非零截止频率 V_c 时, 在接近截止频率处便出现了数值计算上的某些困难。在这种情况下, $B(V)$ 曲线发生很大变形, 其微分变化的速度很快。很容易看出, 当 V 接近 V_c 时, 在截止频率处, 各种导波的 $d(VB)/dV$ 和 $V(d^2(VB)/dV^2)$ 均趋于零。

图 6 见下页

图 6 表示当 $R = -0.5$ 时, 在 $B=0$ 的附近发生的情况。左边的纵坐标是 $B_2 = \beta - k_0 n_2 / k_0 (n_1 - n_2) = B(1+R) - R$, 下边的横坐标是 $V_{12} = V(1+R)^{-1/2}$, 这一座标系统对虚线适用, 它表示无外包层光纤的归一化传输参数。右边的纵坐标 B 与上边的横坐标 V 相结合的座标系统对实线适用, 它表示 $b/a = 1.5$ 和 5 的 $B(V)$

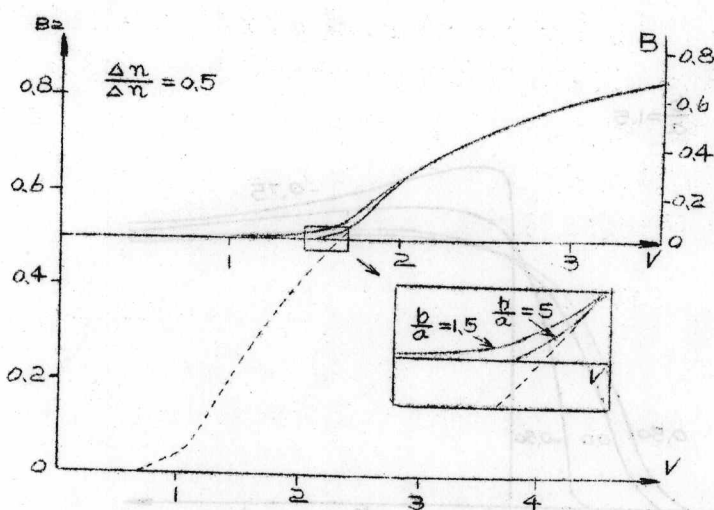


图6 减少内包层对 $B(V)$ 曲线的影响
(详细介释见正文)

值。显然， b/a 愈大，则 B 的变化就愈剧烈，这就导致 $d(VB)/dV$ 及 $V(d^2(VB)/dV^2)$ 的迅速变化。粗略地说，当 V_c 趋近图4中 $V_c(b/a)$ 曲线的渐近值时， $d^2(VB)/dV^2$ 就出现尖峰。这一极限值相当于图6中 $B_2(V_{12})$ 曲线与 V 轴的交汇处。

图7和图8分别表示 $b/a = 1.5$ 和 $b/a = 2$ 时，在各种 $\Delta n'/\Delta n$ 时的 $d(VB)/dV$ (a) 和 $V(d^2(VB)/dV^2)$ (b)。人们可以看出上述曲线的特色，尤其是当 $b/a \rightarrow \infty$ ， V_c 接近其渐近值时， $d^2(VB)/dV^2$ 的数值就很大。

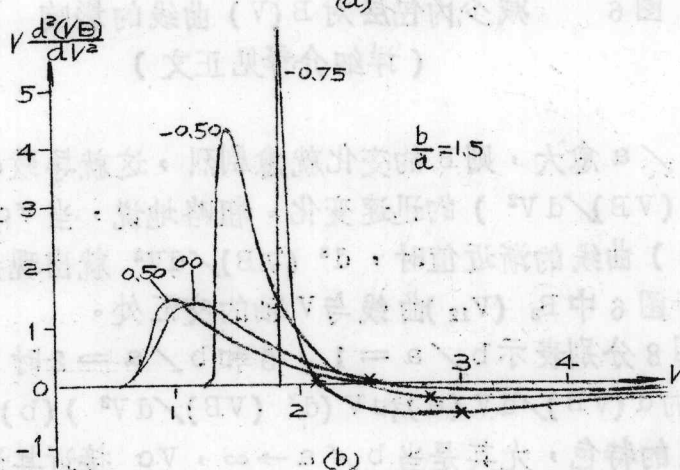
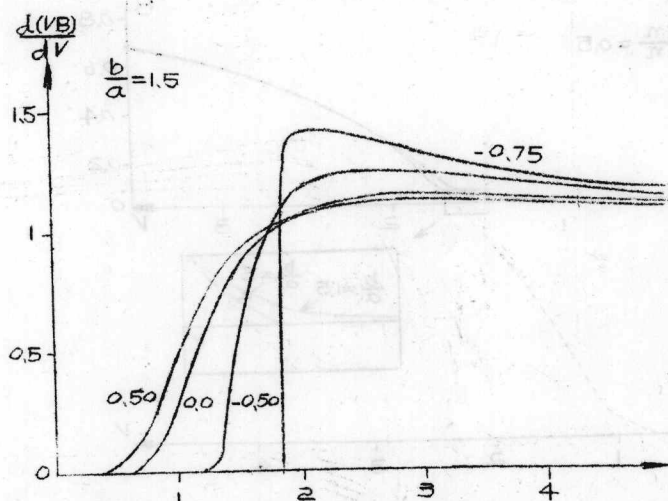


图7 当 $b/a = 1.5$ 时, 在各种 $\Delta n'/\Delta n$ 情况下的色散参数 $d(VB)/dV$ (a) 和 $V(d^2(VB)/dV^2)$ (b)
+ 字符合表示单模工作状态的极限

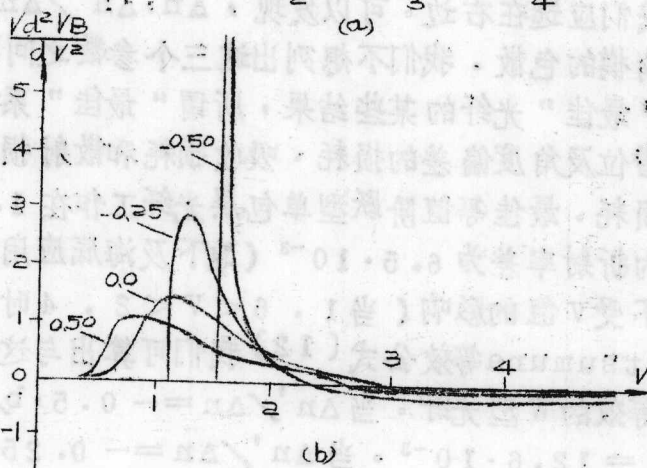
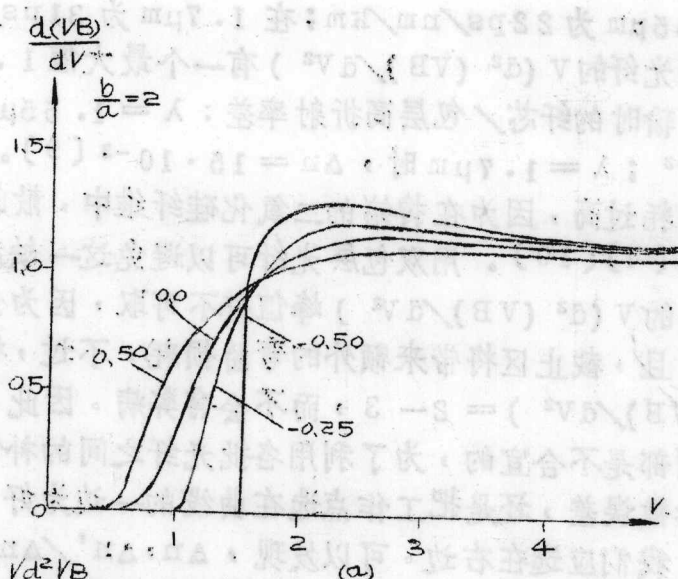


图8 当 $b/a = 2$ 时, 在各种 $\Delta n'/\Delta n$ 的情况下色散参数 $d(VB)/dV$ (a) 和 $V(d^2(VB)/dV^2)$ (b), 十字符号表示单模工作状态的极限

C 总的模色散为零

为了在 1.3 至 $1.7 \mu m$ 之间的波长上获得零总色散, 必须用负得很多的模式色散来抵消二氧化硅的正得很多的材料色散 系数 M

(在 $1.55\mu\text{m}$ 为 $22\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$; 在 $1.7\mu\text{m}$ 为 $31\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$)。单包层单模光纤的 $V(d^2(VB)/dV^2)$ 有一个最大值 1.4, 这就导致无色散传输时的纤芯/包层高折射率差: $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 时, $\Delta n = 10 \cdot 10^{-3}$; $\lambda = 1.7\mu\text{m}$ 时, $\Delta n = 15 \cdot 10^{-3}$ [9]。这些高的数值使传输损耗过高, 因为在掺锗的二氧化硅纤维中, 散射损耗随掺锗浓度而增高 [4] [10]。用双包层光纤可以避免这一缺点。利用可以获得的很高的 $V(d^2(VB)/dV^2)$ 峰值并不可取, 因为公差的要求非常严格。而且, 截止区将带来额外的弯曲损耗。不过, 看来可以确保: $V(d^2(VB)/dV^2) = 2-3$, 而不会有弊病。因此, 把工作点选在曲线的顶部是不合宜的, 为了利用各批光纤之间的补偿现象来放宽制造上的参数误差, 还是把工作点选在曲线的一边为好。当然, 为了避免截止, 我们应选在右边。可以发现, $\Delta n, \Delta n'/\Delta n$ 和 b/a 的许多组合能抵消模的色散。我们不想列出这三个参数之间的穷举公式, 而仅仅给出“最佳”光纤的某些结果, 所谓“最佳”系指在考虑到微弯、接头横向错位及角度偏差的损耗、吸收损耗和散射损耗的情况下具有最小的总损耗。最佳等值阶跃型单包层光纤工作在 $1.55\mu\text{m}$ 时, 其纤芯/包层的折射率差为 $6.5 \cdot 10^{-3}$ (地下及海底应用的最佳状态), 这一数值不受 V 值的影响 (当 $1.6 < V < 2.4$ 时) [11]。

从 Matsumura 等效公式 [12] 我们可算出与这种最佳突变型单包层光纤等效的 W 型光纤。当 $\Delta n'/\Delta n = -0.5, b/a = 1.5$ 时, 可求出 $\Delta n = 12.6 \cdot 10^{-3}$ 。当 $\Delta n'/\Delta n = -0.25, b/a = 2.0$ 时, 可求出 $\Delta n = 7.7 \cdot 10^{-3}$ 。利用 (2) 式和图 7、图 8 中的曲线可以发现, 当 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 时, $N\Delta V(d^2(VB)/dV^2)$ 必须等于 $10 \cdot 10^{-3}$; 当 $\lambda = 1.7\mu\text{m}$ 时, 必须等于 $16 \cdot 10^{-3}$, 才能得到下述结果, 使总的色散为零 ($d\tau/d\lambda = 0$) :

$$\frac{\Delta n'}{\Delta n} = -0.50, \frac{b}{a} = 1.5$$

$$\Delta n + \Delta n' = 6.3 \cdot 10^{-3}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = 1.55 \mu\text{m} \rightarrow V \frac{d^2 (VB)}{dV^2} = 1.6, \quad V = 1.8 \\ \lambda = 1.7 \mu\text{m} \rightarrow V \frac{d^2 (VB)}{dV^2} = 2.5, \quad V = 1.65 \end{array} \right.$$

$$\frac{\Delta n'}{\Delta n} = -0.25, \quad \frac{b}{a} = 2$$

$$\Delta n + \Delta n' = 5.8 \cdot 10^{-2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = 1.55 \mu\text{m} \rightarrow V \frac{d^2 (VB)}{dV^2} = 1.7, \quad V = 1.55 \\ \lambda = 1.7 \mu\text{m} \rightarrow V \frac{d^2 (VB)}{dV^2} = 2.8, \quad V = 1.3 \end{array} \right.$$

在给定波长下，这些光纤的总衰减是非常类似的，因为它们与等效的突变型单包层光纤相当（在相同的波长下， V_{eq} 和 W_{eq} 是一样的）。从第二组数据（当 $b/a = 2$ 时）也许可以看出，散射损耗更小，因为纤芯中的掺杂量比单包层光纤少。图 9 表示上述三种结构以及它们的色散性能（它们的衰减非常接近）。

这一特例告诉我们：为了获得 1.3 和 $1.7 \mu\text{m}$ 之间的低损耗无色散光纤，用双包层光纤很可能实现。图 9 上部的曲线告诉我们 W 型光纤的情况如何。我们未考虑掺杂量对材料色散的影响，因为同样的折射率分布可能有不同的解决办法（纯二氧化硅、掺锗或氟以及掺磷的二氧化硅）。在所有情况下，掺杂量对色散的影响均小于 2 ps/nm/km （波长在 1.2 与 $1.9 \mu\text{m}$ 之间）。截面上的缺陷对色散的影响我们也未予考虑，例如，纤芯倾斜对波导色散只有很小的影响。最后，图 9 中的色散曲线在几个 ps/nm/km 中是正确的，其正确程度取决于精确的掺杂浓度以及实际的折射率分布。