

# 单模光纤等色散系数分布的图解

张 申 如

(南京通信工程学院)

## 提 要

对一定光纤材料及剖面型式,以图解方式绘出等色散系数点在结构参数平面内的分布图。它用来选择光纤的芯径和相对折射率差等参数,以满足下述要求:工作波长为零色散,并由规定的色散允差(例如 $\pm 3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$ )确定最可接受的结构允差。

具有极低损耗的单模光纤,在长距离通信网中具有极大的吸引力,但是大容量单模通信系统中最大无中继距离,往往并不是受损耗而是受色散的限制<sup>[1,2]</sup>。因此优化单模光纤的色散特性是十分重要的。

色散特性的优化主要包括下述两个基本要求:(1)由所需的工作波段选择零色散波长(有可能要求有不只一个零色散波长来实现宽带低色散)确定相应的结构参数(芯径、折射率差等)的组合。(2)对所选择的结构参数组还应有足够的允差,以满足目前的工艺精度下色散系数的变动在规定的范围。所以,绘制单模光纤色散系数在结构参数平面内的分布图是有意义的。

## 一、标量波近似下光纤的色散系数

在弱导引标量波近似下,色散系数可表示为<sup>[3]</sup>

$$M_T = M_S + (M_C - M_S) \frac{d(\nu B)}{d\nu} - \frac{N_S \Delta}{\lambda c} \left[ \nu \frac{d^2(\nu B)}{d\nu^2} \right], \quad (1)$$

这里, $\nu$ 是光纤的归一化频率, $\nu = \frac{2\pi}{\lambda} na\sqrt{2\Delta}$ ;  $\Delta$ 为相对折射率差,  $\Delta \approx (n_1 - n)/n_0$ 。其中  $n_1$ 、 $n$  分别为纤芯中部及包层的折射率,  $a$  为纤芯半径,  $\lambda$  为工作波长,  $B$  为归一化传播常数,  $c$  为真空中光速。

可见,首先要根据光纤的色散方程建立光纤的工作参量  $\nu$  与  $d(\nu B)/d\nu$ ,  $\nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  间关系。对于通常的匹配包层阶跃光纤,文献[4]已列出完全的解析式,而其他剖面型式则往往要通过数值计算来得到。

在(1)式中,  $M_S$ 、 $M_C$  分别为包层和纤芯中部材料的色散系数,  $N_S$  为包层的群折射率,这些数值是依据相应材料的 Sellmeier 系数计算得到的。因此使  $M_T$  为某规定值  $M_A$ , 例如,  $M_A = 0$  相应零色散要求  $M_A = \pm 3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  (为本文采用的色散系数允差)等。芯径  $a$  将表现为相对折射率差  $\Delta$  一个复杂的函数(除匹配包层阶跃光纤外其他剖面还包含另外的结构参数为参变量)。为避免求解这个超越方程,我们将叙述图解的方法。

收稿日期: 1985年9月3日; 收到修改稿日期: 1985年11月19日

## 二、四联图的绘制方法

图解方法包括下述步骤,首先绘制四幅曲线图并组合成四联图,然后按步骤在四联图上求取等色散系数的结构参数组。具体叙述如下:

(1) 由给定的 Sellmeier 系数计算  $\text{SiO}_2$  在给定掺杂克分子百分比浓度时对相应的各波长折射率  $n$ 、群折射率  $N$ 、色散系数  $M$ ,以包层和纤芯中部数据按所规定的色散系数允差  $M_a$  来绘制  $y_1 = [(M_s - M_a) / N_s \cdot \Delta] \lambda c$  及  $y_2 = [(M_s - M_c) / N_s \cdot \Delta] \lambda c$  对工作波长  $\lambda$  的曲线。很明显,  $y_1$ 、 $y_2$  数值分别是 (1) 式在  $d(\nu B) / d\nu \sim \nu d^2(\nu B) / d\nu^2$  坐标平面内对应直线的截距和负斜率。

包层为纯  $\text{SiO}_2$ 、芯部以  $\text{GeO}_2$  掺杂的克分子百分比浓度分别为 3.1 mol%、5.8 mol% 和 7.9 mol% 时的曲线\*见图 1。至于其他浓度时的系数,可由三次样条函数插值求得。图 1 反映了光纤材料的性质,计算结果表明,  $\Delta$  值与波长关系不大<sup>[5]</sup>。

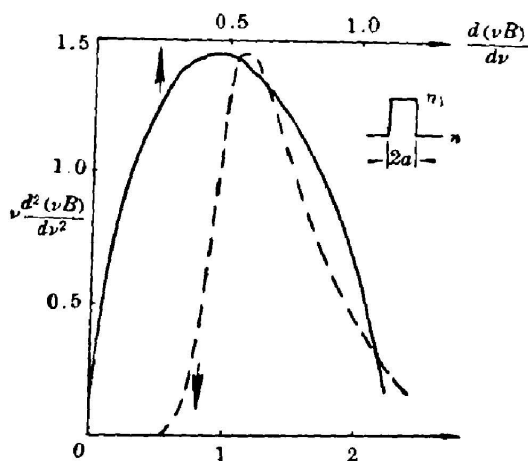


Fig. 2 Waveguide parameters of SISMOP

\* 计算时的 Sellmeier 系数取自文献[4]。

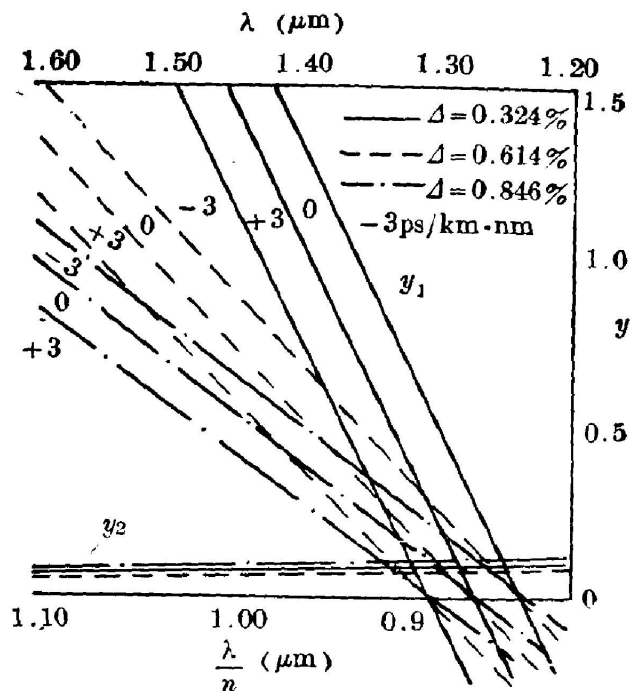


Fig. 1 Material dispersion characteristics of SISMOP for  $\text{GeO}_2$ - $\text{SiO}_2$  core and pure  $\text{SiO}_2$  cladding

$y_1 \sim \lambda$  曲线又分别由  $M_a = -3$  ps/km·nm、0、+3 ps/km·nm 的三条所组成的。结果表明,在图示比例尺度内,  $y_2$  曲线靠得很近,而  $y_1$  与波长关系其线性相关系数高于 0.99。因此,  $y_1$  在  $\lambda = 1.20 \sim 1.60 \mu\text{m}$  内间隔为  $0.02 \mu\text{m}$  的 21 个取样点,以最小二乘法线性拟合的结果为

$$y_1 = \begin{cases} (2.586\lambda - 3.215) \times 10^{-2} / \Delta, & \text{对 } M_a = -3 \text{ ps/km} \cdot \text{nm} \\ (2.525\lambda - 3.215) \times 10^{-2} / \Delta, & \text{对 } M_a = 0 \\ (2.463\lambda - 3.215) \times 10^{-2} / \Delta, & \text{对 } M_a = +3 \text{ ps/km} \cdot \text{nm} \end{cases} \quad (2)$$

上述各式中  $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,括号内部分拟

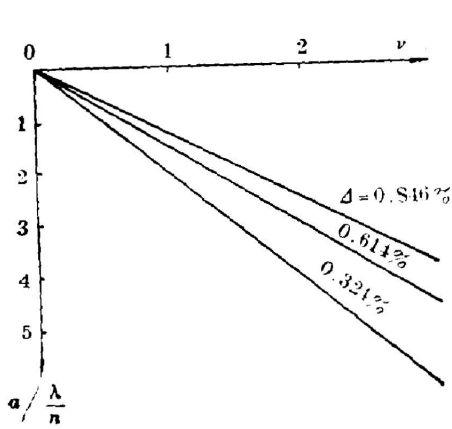


Fig. 3  $\nu$  versus  $a \frac{\lambda}{n}$

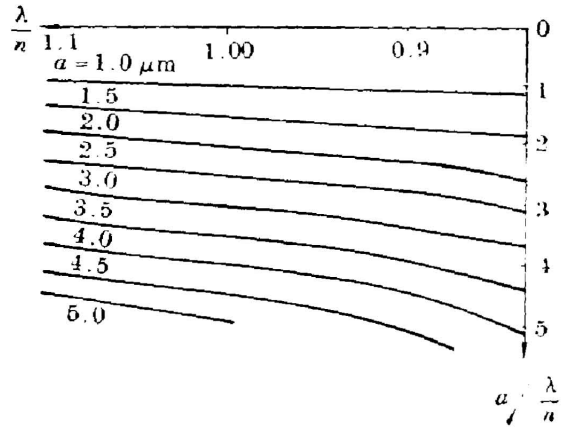


Fig. 4  $\frac{\lambda}{n}$  versus  $a \frac{\lambda}{n}$

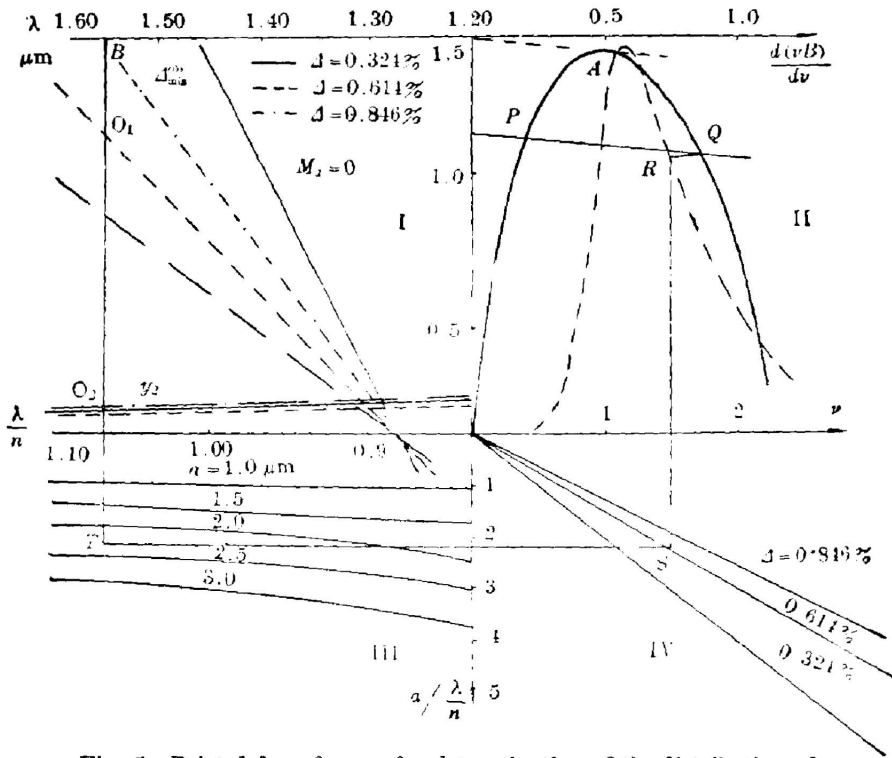


Fig. 5 Related four figures for determination of the distribution of isodispersion coefficient, shown here with numerical examples

合后剩余标准离差  $s$  为 0.0037。这也就是说,  $y_1$  的精确值落入拟合直线周围  $\pm 2s$  范围的概率将是 95.4%, 这个拟合精度是令人满意的。利用 (2) 式, 很容易插入任意  $\Delta$  时的曲线族。

(2) 由给定的匹配包层阶跃单模光纤色散方程<sup>[4]</sup> 完成  $d(\nu B)/d\nu$ 、 $\nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  对  $\nu$  的计算, 并绘出  $\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  及  $d(\nu B)/d\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线, 如图 2 所示。显然, 这是一组由光纤结构(剖面类型和参数)决定的曲线, 改变结构会有不同的曲线相应。

(3) 以  $\nu$  与  $a/(\lambda/n)$  为坐标, 依据  $\nu = 2\pi a \sqrt{2\Delta}/(\lambda/n)$  作出的归一化频率  $\nu$  对归一化芯径  $a/(\lambda/n)$  的曲线, 如图 3 所示。

(4) 以  $\lambda/n$  与  $a/(\lambda/n)$  为坐标绘制的以  $a$  为参变量的曲线族, 如图 4 所示。

完成这四幅图, 就可将它们对应轴联系起来构成如图 5 那样的四联图。联系时要注意的是, 图 1 的  $\lambda$  (真空中光波长) 坐标轴要与图 4 的  $\lambda/n$  (包层中光波长) 坐标轴对应起来。有了图 5, 就可以进行等色散系数点在结构参数平面内分布图的绘制。

### 三、等色散系数分布图绘制的例示

给定一个  $\Delta$ , 可按下述一定步骤去寻找色散系数为给定值  $M_s$  时的芯径  $a$ 。将  $(\Delta, a)$  逐点相连, 就形成了结构参数平面内等色散系数分布图。

例如, 要确定包层为纯  $\text{SiO}_2$ 、芯区为掺  $\text{GeO}_2$  的  $\text{SiO}_2$  阶跃单模光纤在  $1.55 \mu\text{m}$  零色散点的分布。选  $\Delta = 0.614\%$ , 先在图 5 的 I 区 (相应图 1, 以下类推) 中, 由  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  确定在该  $\Delta$  时  $M_s = 0$  的截距  $y_1$  和负斜率  $y_2$  值, 其值分别为 1.13 和 0.059。继而在图 5 的 II 区内, 以该截距和负斜率作直线与  $d(\nu B)/d\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线交于 P、Q 两点。以 Q 点为例, 在图 5 II 区, 从 Q 点作水平线交该区  $\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线于 R 点, 从而得到相应的水平坐标  $\nu$  值。在图 5 IV 区, 可确定该  $\nu$  值对  $\Delta = 0.614\%$  时的归一化芯径  $a/(\lambda/n)$  值, 约为 2.15。最后在图 5 的 III 区, 由  $a/(\lambda/n)$  及  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  (相应  $(\lambda/n) = 1.07 \mu\text{m}$ ) 标出相应的 T 点, 它对应  $a \approx 2.30 \mu\text{m}$ 。因此, 参数组  $(\Delta, a)$  (0.614%, 2.30  $\mu\text{m}$ ) 即为所求的一个结构参数点。

类似的操作, 既可确定与 P 点对应的参数组为 (0.614%, 1.40  $\mu\text{m}$ ); 再选  $\Delta = 0.846\%$  等, 又可分别获取相应的两个芯径  $a$  值。确定了一对对这样的结构参数点  $(\Delta, a)$ , 从而在结构参数平面内, 画出满足  $1.55 \mu\text{m}$  为零色散波长的完整分布曲线。

值得指出的是, 当  $\Delta$  为 0.324% 时, 在 I 区所得到的截距  $y_1$  已超出图外, II 区对应的直线与  $d(\nu B)/d\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线已不成交, 它表明过低的相对折射率差, 不足以将零色散波长移动至  $1.55 \mu\text{m}$  处, 这一现象是众所周知的。这一点在图解法中更明显, 它是与单模阶跃光纤  $\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线存在一个略小于 1.5 的极值相关联。此外, 还可以从图 5 估计出, 使  $1.55 \mu\text{m}$  获取零色散时最小  $\Delta$  的近似值。注意到在图示各种掺杂的  $\Delta$  时, 负斜率  $y_2$  大体相同, 因此可用作 PQ 平行线来近似求取  $\Delta_{\min}$ 。该平行线与 II 区的  $d(\nu B)/d\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线相切于 A 点。由该切线对应的截距  $y_1$  值, 可在图 5 I 区得到相应于  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  的 B 点, 它与  $M_s = 0$  曲线族在波长轴公共交点处相连成直线。利用上节所述近似式 (2), 可确定此直线相应  $\Delta_{\min}^{(0)} \approx 0.475\%$ 。

四联图还可以用来确定  $M_s = \pm 3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  色散点的分布, 以及其他波长时等色散系数点的情况。利用四联图得到的单模阶跃光纤, 其工作波长在  $1.31 \mu\text{m}$  及  $1.55 \mu\text{m}$  附近, 且满足  $M_s = 0, \pm 3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  要求的结构参数点的分布情况见图 6。该图曲线形状类似于文献 [5] 结果。

图 6 在光纤设计中是有实用意义的。利用图 6 可确定所选工作波长下零色散所要求的结构参数组, 进而再考虑此参数组对工作波长及几何结构参数按  $|M_s| \leq 3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  所规

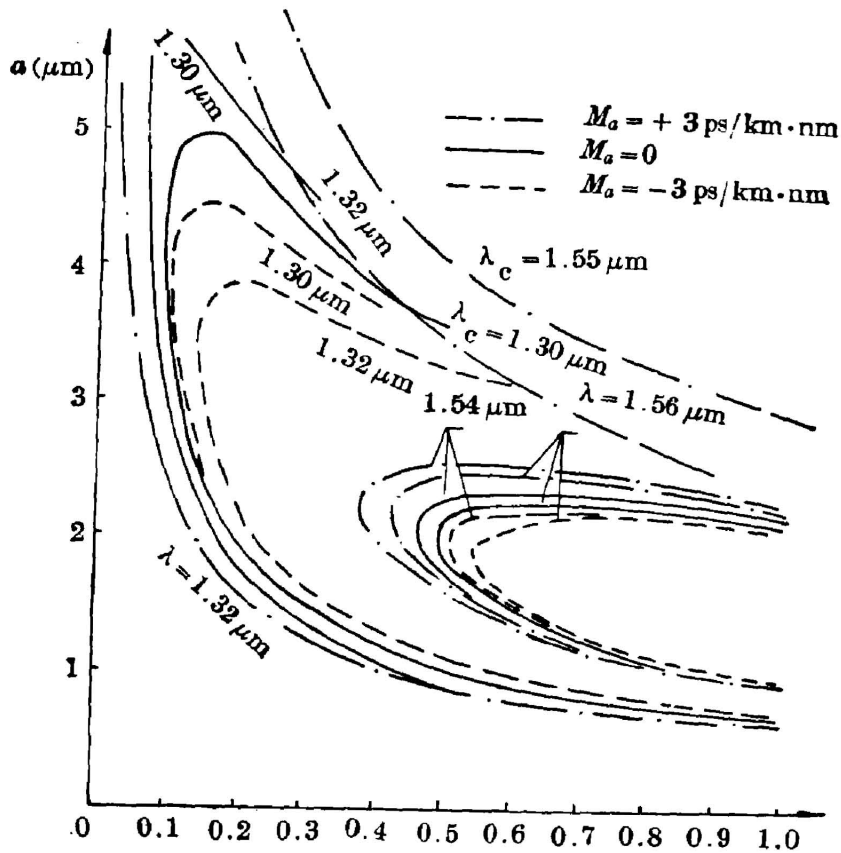


Fig. 6 Plot of isodispersion-coefficient distribution of SISMOF

定的允差。例如  $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$ , 选择  $\Delta = 0.25\%$ , 芯半径  $a$  在单模区间内允差范围为  $3.80 \sim$

$4.80 \mu\text{m}$ 。若选  $a = 4.30 \mu\text{m}$ , 此时  $\Delta$  的允差范围可以小于  $0.1 \sim 0.30\%$ 。又例如,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时, 选择  $0.7\%$ , 则芯半径  $a$  的允差范围为  $2.20 \sim 2.45 \mu\text{m}$ 。

原则上, 只要根据所选材料去更换图 5 I 区相应曲线, 根据所选剖面型式去更换图 5 II 区相应曲线, 那末四联图也可用于图解其他材料和剖面型式单模光纤色散系数的分布。例如, 对内包层半径与芯区半径之比 ( $b/a$ ) 取为 2, 芯-内包层折射率差与芯-外包层折射率差之比 ( $(n_1 - n_2)/(n_1 - n)$ ) 也取为 2 的光纤。图 7 示出了这样单模 W 型光纤波导参数的计算结果<sup>[3]</sup>。将图 7 替换图 5 中 II 区, 即可利用替换后的新四联图得到该单模 W 型光纤等色散系数的分布图, 如图 8 所示。它

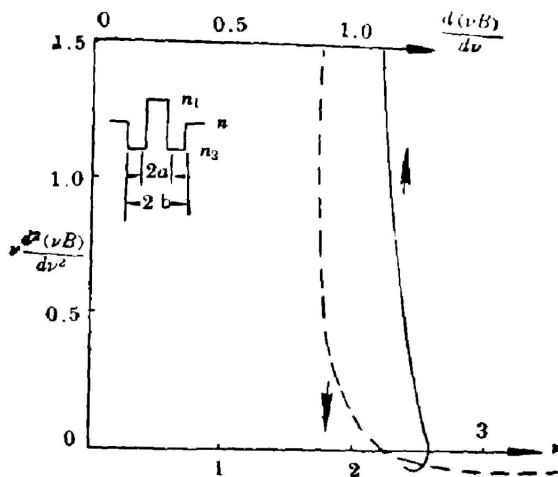


Fig. 7 Waveguide parameters of W-type SMOF

即可利用替换后的新四联图得到该单模 W 型光纤等色散系数的分布图, 如图 8 所示。它

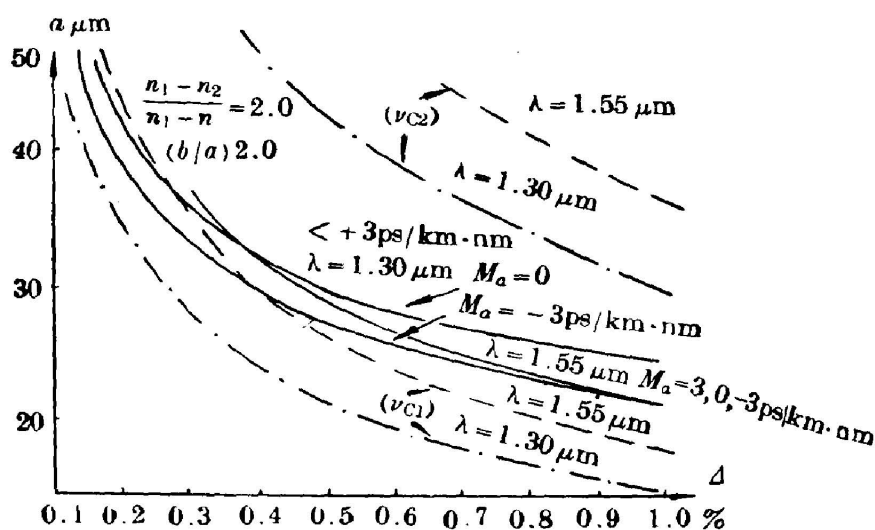


Fig. 8 Plot of isodispersion-coefficient distribution of W-SMOF

表明了工作波长在  $1.30 \mu\text{m}$  及  $1.55 \mu\text{m}$  时,  $M_a$  分别取  $0, \pm 3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$ , 单模范围内参数组  $(\Delta, a)$  所允许的范围。可见该 W 光纤应用在  $1.30 \mu\text{m}$  时, 有十分宽的结构允差。但当工作在  $1.55 \mu\text{m}$  时, 这个允差变得相当窄小。作者认为这是由于 W 光纤补偿材料色散所应有的波导色散, 决定它的  $\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线, 比单包层阶跃光纤有更陡的上升和下降沿。

值得指出, 图 8 中两个波长的零色散曲线大致相交于  $\Delta \approx 0.40\%$ 、 $a = 3.2 \mu\text{m}$  处。这意味着在这个结构参数选择下 W 光纤, 具有两个零色散波长, 但对  $1.55 \mu\text{m}$  结构允差是很小的。

#### 四、图解法精度的估计

要严格地讨论上述结果的精度是困难的。但是, 在一定条件下对作图法所带来的误差可作估算。

为此假定:

(1) 能够利用 Sellmeier 方程精确地计算材料的  $n$ 、 $N$ 、 $M$  及  $y_1$ 、 $y_2$  参数, 这对于 Sellmeier 系数(已由文献中实验给出的那些取样点)是不成问题的。然而, 对于任意掺杂浓度 Sellmeier 系数, 是由三次样条函数插值得到的, 或进一步简化利用(2)式近似式计算  $y_1$  时, 它取决于取样点数目、插值方式、插入点位置等, 一般地估算较为麻烦。考虑到我们这里关心的是作图法本身的精度, 为简化起见, 假设它们也是足够精确的。

(2) 能以足够精度精确地计算光纤的  $\nu \sim d(\nu B)/d\nu$ 、 $\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  数值关系, 只要适当地提高计算机数值解色散方程的精度, 这点是容易满足的。

(3) 作图过程是十分仔细地进行的, 图中每一曲线点的作图误差都取最小方格之半(相应长度为  $0.5 \text{ mm}$ )。

因此,在图解应用时,总的读数误差为两部分之和:所读坐标固有的作图误差和该图中另一对应坐标上的误差经曲线所示函数关系传递所致间接误差。

从上述假定出发估算了作图法的精度,所得到主要结果如下:

(1) 由给定  $\lambda$ 、 $\Delta$  作图确定  $\alpha$  参数的相对误差约为 7%。如果适当放大四联图的图幅,减小每一次作图误差,可以进一步降低这个值。

(2)  $\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线变得平坦的相应的  $\nu$  值区域较大,则作图法精度锐减。但它在图示的例子中,只是出现在  $\lambda=1.30 \mu\text{m}$ , 且  $M_a > 0 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  时。然而,讨论的  $M_a = +3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  恰好已使类似于图 5 中 PQ 的直线与  $d(\nu B)/d\nu \sim \nu d^2(\nu B)/d\nu^2$  曲线不再相交。这样,结构参数平面内  $M_a = 0 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  曲线上方(参阅图 6、图 8)的整个单模范围都满足  $< +3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  的要求。如果不再需要去绘制  $M_a$  从  $0 \sim +3 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$  间更细致的等色散系数分布,这个精度下降的困难被回避了。

## 五、结 论

以四联图形式,绘制了单模阶跃光纤和 W 型单模光纤在  $1.30 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  附近等色散系数分布图。粗略的精度分析表明,它们的误差是可以接受的。分布图可用以按零色散波长的要求,选择适宜的结构参数组,并可用以按色散系数要求确定结构参数的允差。

## 参 考 文 献

- [1] T. Nakahara *et al.*; *Proceeding of SPIE*, **425**, (San Diego, California, Aug., 1983), 2.
- [2] S. Yamamoto *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 2 (Feb), 264.
- [3] M. Monell; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 4 (Apr), 535.
- [4] M. J. Adams; *An Introduction to Optical Waveguides*, (Chichester, New York, 1981), 233.
- [5] H. Tsuchiya *et al.*; *Electron. Lett.*, 1979, **15**, No. 15 (Jul), 476.

## **A graphic method for determining distributions of isodispersion coefficients of single-mode fibers**

ZHANG SHENRU

*(Nanjing Institute of Communication Engineering)*

(Received 3 September 1985)

### **Abstract**

With given material and profile type of the fiber, its isodispersion-coefficient distribution in the structure parameter plane can be drawn. By using such graph, the core diameter and relative core-cladding index difference are selected to meet the following demands: at the operating wavelength, zero dispersion coefficient is required; and from the predetermined dispersion tolerance (e.g.,  $\pm 3$  ps/km·nm) the best acceptable structural tolerance is determined.