

文章编号: 0258-702X(2002)01-0052-03

# W-型单模单偏振光纤中的硼掺杂和带宽

季敏宁

(昆明理工大学理学院光纤技术研究中心, 云南 昆明 650093)

**提要** 分析了 W-型单模单偏振光纤中, 椭圆内包层硼掺杂量与单模单偏振带宽的关系, 得出了长 W-型单模单偏振光纤的带宽与内包层硼掺杂量的大小无关, 它只由光纤几何结构以及内包层折射率深度确定, 而对于短 W-型单模单偏振光纤, 硼掺杂量的增加可以增大截止基模能量损耗, 从而适度提高其消光比和有效带宽。

**关键词** W-型单模单偏振光纤, 硼掺杂量, 带宽

中图分类号 TQ 342+.82 文献标识码 A

## Boron-doped Content and Band-width of W-tunneling Optical Fiber

Ji Min-ning

(Optical Fiber Research Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

**Abstract** Relationship between boron-doped content and single polarization single mode band-width of W-tunneling optical fiber is analysed. The band-width is independent on the boron-doped content and is determined only by the profile structure and refractive index depth of the inner cladding when the fiber is long enough. For short W-tunneling optical fiber, increasing of boron doped content can raise leakage losses of the fundamental modes below cut-off. It can enhance extinction ratio and effective band-width of the fiber to some extent.

**Key words** W-tunneling optical fiber, boron-doped content, band-width

## 1 引 言

W-型单模单偏振光纤<sup>[1~3]</sup>是一种具有单一模式单一偏振态的光纤, 比高双折射保偏光纤具有更强的偏振态稳定传输和控制能力, 可广泛用于相干光通信、光纤传感、偏振态控制器件, 以及高清晰度图像传输。W-型单模单偏振光纤的带宽是 W-型单模单偏振光纤最为重要的性能指标, 它决定着 W-型单模单偏振光纤的基本性质。对 W-型单模单偏振光纤带宽的研究有助于此类光纤的设计制造和实际应用。本文就 W-型单模单偏振光纤的带宽与光纤制作工艺参数——硼掺杂量的关系进行严格的理论分析, 从而得出有用的结论, 为 W-型单模单偏振光纤制作工艺参数的选择提供依据。

## 2 光纤带宽与椭圆内包层硼掺杂量的

## 关系

W-型单模单偏振光纤的结构如图 1 所示。它由具有最高折射率  $n_c$  的圆形纤芯 ( $\text{SiO}_2$ ), 具有最低折射率  $n_s$  的椭圆内包层——应力层 ( $\text{SiO}_2$  衬底上的硼掺杂), 以及折射率介于其间的外包层  $n_{cl}$  (掺氟的  $\text{SiO}_2$ ) 组成。由于内-外包层交界面不是圆形, 内包层的掺硼材料和外包层的  $\text{SiO}_2$  材料, 其热膨胀系数又不一样, 因而在纤芯和内包层区形成应力双折射<sup>[4]</sup>。平行于内包层长轴方向的偏振光 ( $X$ -偏振光) 和平行于内包层短轴方向的偏振光 ( $Y$ -偏振光), 它们的有效折射率不一样。图 2(a) 和 (b) 给出了  $X$ -偏振光和  $Y$ -偏振光沿短轴和长轴的等效折射率分布。

由于 W-型单模单偏振光纤  $X$ -偏振光和  $Y$ -偏振光的等效折射率不一样, 其  $X$ -偏振模和  $Y$ -偏振模的基模截止波长  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  也不一样, 在  $\lambda_x$  和  $\lambda_y$  之间存在

收稿日期 2000-09-11; 收到修改稿日期 2001-01-08

基金项目: 云南省自然科学基金(编号: 1999F0002R) 资助项目。

作者简介: 季敏宁(1964.4—), 男, 副教授, 1985 年 7 月毕业于北京大学物理学系, 获理学学士学位。1999 年 3 月毕业于上海大学光纤研究所, 获工学博士学位。主要研究方向: 单模单偏振光纤, 光纤器件, 光纤传感, 相干光通信。

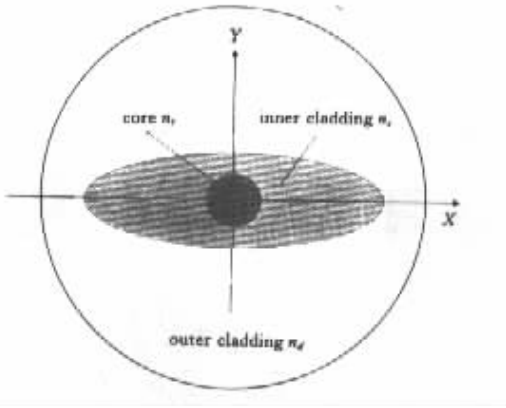


图 1 W-型单模单偏振光纤的剖面结构图  
Fig.1 Cross section of W-tunneling fiber

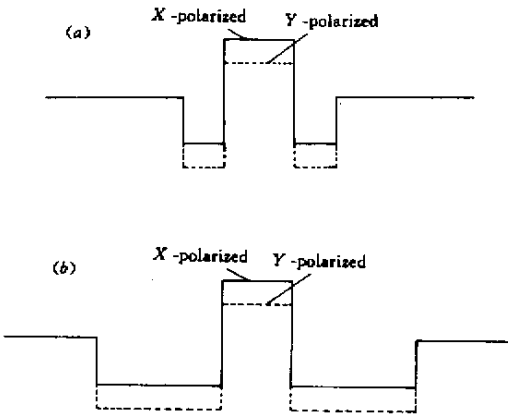


图 2 W-型单模单偏振光纤的折射率剖面图  
(a)短轴方向折射率分布图 (b)长轴方向折射率分布图  
Fig.2 Profile of W-tunneling fiber refractive index  
(a)refractive index along minor axis ;  
(b)refractive index along major axis

一个单模单偏振窗口  $\Delta\lambda = \lambda_x - \lambda_y$  ,在这个窗口内 ,一个模式( X-偏振模 )作为导模传输 ,另一个模式( Y-偏振模 )作为截止基模不断被损耗。对于长 W-型单模单偏振光纤 (通信或传感用光纤 ;长度从几米到几十千米不等) ,由于截止基模不断被损耗掉 ,最后实际上只剩下导模在传输 ,所以对于长 W-型单模单偏振光纤 ,其有效带宽 (消光比  $\geq 20$  dB ;导模损耗  $\leq 1$  dB)就等于单模单偏振窗口的大小  $\Delta\lambda$  。对于短 W-型单模单偏振光纤 (如偏振起偏器 ;长度通常在厘米量级) ,虽然截止基模不断被损耗 ,但在输出端仍然没有被完全损耗掉 ,因而其有效带宽比单模单偏振窗口的大小  $\Delta\lambda$  小 ,它与截止基模能量损耗大小的具体值有关。

2.1 长 W-型单模单偏振光纤的带宽与椭圆内包层

硼掺杂量的关系

W-型单模单偏振光纤在弱导近似下满足方程<sup>[5]</sup>

$$\nabla_t^2 E + [k^2 n^2(x, y) - \beta^2] E = 0 \quad (1)$$

其中  $E$  代表模场横向电场分量 , $n(x, y)$  代表剖面折射率分布 , $\beta$  为传播常数 , $k = 2\pi/\lambda$  , $\lambda$  为自由空间光波长 , $\nabla_t^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  。考虑 X-偏振模或 Y-偏振模时 ,剖面折射率分布用其等效折射率  $n^x(x, y)$  或  $n^y(x, y)$  代入。

长度量用纤芯半径  $c$  归一化 ,那么在纤芯、内包层和外包层区 ,方程(1)具有形式  
纤芯区

$$\nabla_t^2 E + u^2 E = 0, \quad u = \sqrt{\nu^2 - w^2} \quad (2a)$$

内包层区

$$\nabla_t^2 E - \kappa^2 E = 0, \quad \kappa = \sqrt{d\nu^2 + w^2} \quad (2b)$$

外包层区

$$\nabla_t^2 E - w^2 E = 0, \quad w = \sqrt{\beta^2 - n_c^2 k^2 c^2} = \sqrt{\beta^2 - \nu^2/2\Delta} \quad (2c)$$

其中  $u, \kappa, w$  代表纤芯、内包层和外包层的模场参数 , $\nu = \sqrt{n_c^2 - n_{cl}^2} kc = n_{cl} \sqrt{2\Delta} kc$  代表归一化频率 , $d = \frac{n_{cl}^2 - n_s^2}{n_c^2 - n_{cl}^2} \approx \frac{n_{cl} - n_s}{n_c - n_{cl}}$  代表内包层折射率深度 , $\Delta = \frac{n_c^2 - n_{cl}^2}{2n_{cl}^2} \approx \frac{n_c - n_{cl}}{n_{cl}}$  代表纤芯和外包层相对折射率差。

方程(2a)(2b)和(2c)以及横向电场分量  $E$  满足的电磁边条件 ,共同构成一个边条件问题。其中边条件由交界面的形状——纤芯和内包层的圆形界面( $r = 1$  的圆)以及内包层和外包层的椭圆形界面(长半轴为  $a$  ,短半轴为  $b$  的椭圆)决定。方程(2a)(2b)和(2c)由模场参数  $u, \kappa, w$  决定。基模截止时 ,模场参数变为  $u = \nu, \kappa = \sqrt{d\nu}, w = 0$  。因此方程(2a)(2b)(2c)由参数  $\nu, d$  确定。由此可见 ,光纤结构参数  $a, b, d$  给定时 ,基模截止归一化频率  $\nu$  可由方程(2a)(2b)(2c)以及横向电场分量  $E$  满足的电磁边条件算出。 $\nu$  是椭圆内包层长半轴  $a$  ,短半轴  $b$  和内包层折射率深度  $d$  的函数<sup>[6]</sup>。

对于 X-偏振模和 Y-偏振模 相应

$$\begin{aligned}\nu_x &= \sqrt{(n_c^x)^2 - (n_d^x)^2} \frac{2\pi c}{\lambda_x} = \frac{2\pi c n_d^x \sqrt{2\Delta_x}}{\lambda_x} \\ d_x &= \frac{(n_c^x)^2 - (n_s^x)^2}{(n_c^x)^2 - (n_d^x)^2} \approx \frac{n_d^x - n_s^x}{n_c^x - n_d^x} \\ \Delta_x &= \frac{(n_c^x)^2 - (n_d^x)^2}{2(n_d^x)^2} \approx \frac{n_c^x - n_d^x}{n_d^x}\end{aligned}\quad (3a)$$

$$\begin{aligned}\nu_y &= \sqrt{(n_c^y)^2 - (n_d^y)^2} \frac{2\pi c}{\lambda_y} = \frac{2\pi c n_d^y \sqrt{2\Delta_y}}{\lambda_y} \\ d_y &= \frac{(n_c^y)^2 - (n_s^y)^2}{(n_c^y)^2 - (n_d^y)^2} \approx \frac{n_d^y - n_s^y}{n_c^y - n_d^y} \\ \Delta_y &= \frac{(n_c^y)^2 - (n_d^y)^2}{2(n_d^y)^2} \approx \frac{n_c^y - n_d^y}{n_d^y}\end{aligned}\quad (3b)$$

其中  $n_c^x, n_s^x, n_d^x$  和  $n_c^y, n_s^y, n_d^y$  分别代表纤芯、内包层和外包层区, 对应于  $X$ -偏振模和  $Y$ -偏振模的等效折射率。由于外包层区没有各向异性应力,  $n_c^x = n_d^y = n_c$  (见参考文献 [4]), 式(3a)(3b)可写为

$$\lambda_x = \frac{2\pi c n_d^x \sqrt{2\Delta_x}}{\nu_x} \quad (4a)$$

$$\lambda_y = \frac{2\pi c n_d^y \sqrt{2\Delta_y}}{\nu_y} \quad (4b)$$

基模截止时,  $\nu_x$  和  $\nu_y$  分别由  $a, b, d_x$  和  $a, b, d_y$  确定, 而

$$d_x = \frac{n_c^x - n_s^x}{n_c^x - n_d^x} = \frac{dn_{cl}\Delta - \frac{B}{2}}{n_{cl}\Delta + \frac{B}{2}} \quad (5a)$$

$$d_y = \frac{n_c^y - n_s^y}{n_c^y - n_d^y} = \frac{dn_{cl}\Delta + \frac{B}{2}}{n_{cl}\Delta - \frac{B}{2}} \quad (5b)$$

其中  $B$  为应力双折射,  $B = n_c^x - n_c^y = n_s^x - n_s^y$  (纤芯区和内包层区具有相同大小的应力双折射<sup>[4]</sup>)。

注意到应力双折射  $B$  与内包层硼掺杂量  $\eta$  的正比例关系  $B \propto \eta \frac{a-b}{a+b}$  (见文献 [4]),  $B = n_x - n_y = \frac{1}{2} n \chi (p_{11} - p_{12}) \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{1 - N^2} \frac{a-b}{a+b}$  ( $\alpha_1 - \alpha_2$  是内-外包层的热膨胀系数差。由于氟掺杂对外包层的热膨胀系数几乎没有影响, 它的作用只是控制外包层折射率的高低, 因此内-外包层的热膨胀系数差  $\alpha_1 - \alpha_2$  只和内包层的硼掺杂量  $\eta$  有关, 它们成正比例关系), 以及内包层相对于纤芯的折射率下陷量  $n_c - n_s = (1+d)n_{cl}\Delta$  与硼掺杂量  $\eta$  的正比例关系  $(1+d)n_{cl}\Delta \propto \eta$ , 有

$$B = \zeta_1 \eta \frac{a-b}{a+b} \quad (6a)$$

$$(1+d)n_{cl}\Delta = \zeta_2 \eta \quad (6b)$$

其中  $\zeta_1$  和  $\zeta_2$  是比例系数, 它们由  $\text{SiO}_2$  材料和硼的内在属性以及拉丝温度和室温差值  $\Delta T$  确定, 与硼掺杂量  $\eta$  和椭圆内包层尺寸  $a, b$  无关。

将(6a)(6b)代入(5a)(5b)有

$$d_x = \frac{\zeta_2 \frac{d}{1+d} - \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b}}{\frac{\zeta_2}{1+d} + \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b}} \quad (7a)$$

$$d_y = \frac{\zeta_2 \frac{d}{1+d} + \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b}}{\frac{\zeta_2}{1+d} - \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b}} \quad (7b)$$

从(7a)(7b)可以看出, 光纤结构参数  $a, b, d$  给定时,  $d_x, d_y$ ——因而  $\nu_x, \nu_y$  因之确定。  $X$ -偏振模和  $Y$ -偏振模的基模截止归一化频率  $\nu_x, \nu_y$  是光纤结构参数  $a, b, d$  的函数, 它们与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的大小无关。

利用上面得到的结论以及式(4a)和(4b), 对于长 W-型单模单偏振光纤, 单模单偏振带宽 Band (百分比带宽  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ ) 为

$$\text{Band} = 2 \frac{1 - \frac{\nu_x}{\nu_y} \sqrt{\frac{\Delta_y}{\Delta_x}}}{1 + \frac{\nu_x}{\nu_y} \sqrt{\frac{\Delta_y}{\Delta_x}}} \quad (8a)$$

其中

$$\begin{aligned}\Delta_x &= \frac{n_{cl}\Delta + \frac{B}{2}}{n_{cl}} = \frac{\zeta_2}{1+d} + \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b} \eta \\ \Delta_y &= \frac{n_{cl}\Delta - \frac{B}{2}}{n_{cl}} = \frac{\zeta_2}{1+d} - \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b} \eta\end{aligned}\quad (8b)$$

$$\frac{\Delta_y}{\Delta_x} = \frac{\frac{\zeta_2}{1+d} - \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b}}{\frac{\zeta_2}{1+d} + \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b}} \quad (8c)$$

从式(8a)(8c)知, 当光纤结构参数  $a, b, d$  给定时, 长 W-型单模单偏振光纤的带宽 Band 就已确定, 它与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的大小无关, 只与  $\text{SiO}_2$  材料和硼的内在属性以及拉丝温度和室温差值  $\Delta T$  等因素有关。

## 2.2 短 W-型单模单偏振光纤的带宽与椭圆内包层硼掺杂量的关系

与长度在米量级以上的长 W-型单模单偏振光

纤不同,短 W-型单模单偏振光纤通常在厘米量级,截止基模在传输过程中未被完全损耗掉,因而短 W-型单模单偏振光纤的有效带宽(消光比  $\geq 20$  dB,导模损耗  $\leq 1$  dB)比单模单偏振窗口的大小  $\Delta\lambda = \lambda_x - \lambda_y$  要小,它和截止基模能量损耗大小的具体值有关。

如果截止基模能量损耗系数为  $\alpha$ ,光纤长度为  $L$ ,那么输出端截止基模能量衰减为  $P_{out}/P_{in} = e^{-\alpha L}$ 。输出端导模(X-偏振模)相对于截止模(Y-偏振模)的消光比为  $dB = \alpha \frac{L}{c} 10 \lg(e)$ 。由此可见,对于长度一定的光纤,截止基模能量损耗系数  $\alpha$  越大,导模相对于截止模的消光比也越大,因而有效带宽也越大。由于能量损耗系数  $\alpha = 2\text{Im}\beta$  (代表传播常数  $\beta$  的虚部),而  $\beta = \sqrt{w^2 + \frac{\nu^2}{2\Delta}} \approx \frac{\nu}{\sqrt{2\Delta}} \left(1 + \Delta \frac{w^2}{\nu^2}\right)$  (截止点附近,  $w^2$  和  $\frac{\nu^2}{2\Delta}$  相比是一个小量),  $\text{Im}\beta = \frac{\sqrt{2\Delta}}{2\nu} \text{Im}(w^2)$  (基模截止后,外包层模场参数  $w$  变为虚数),所以

$$\alpha = \frac{\sqrt{2\Delta}}{\nu} \text{Im}(w^2) \quad (9)$$

由纤芯、内包层和外包层区的弱导方程(2a), (2b) (2c),以及边条件交界面的形状知,光纤结构参数  $a, b, d$  给定时,外包层模场参数  $w$  由归一化频率  $\nu$  确定。因而对于给定的光纤结构参数  $a, b, d$  和归一化频率  $\nu$ ,截止基模能量损耗系数  $\alpha$  正比于纤芯和外包层相对折射率差  $\Delta$  的平方根:  $\alpha \propto \sqrt{\Delta}$ 。

由于截止模是 Y-偏振模,截止基模能量损耗系数  $\alpha = \alpha_y \propto \sqrt{\Delta_y}$ 。而从方程(8b)知

$$\Delta_y = \left( \frac{\zeta_2}{1+d} - \frac{\zeta_1}{2} \frac{a-b}{a+b} \right) \frac{\eta}{n_{cl}}$$

所以

$$\alpha \propto \sqrt{\eta} \quad (10)$$

式(10)表明,W-型单模单偏振光纤截止基模能量损耗系数  $\alpha$  正比于椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的平方根。椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  越大,截止基模能量损耗系数  $\alpha$  也越大,相应的消光比和有效带宽也越大。因此,对于短 W-型单模单偏振光纤,为了提高其消光比和有效带宽,可适度增大椭圆内包层硼掺杂的含量  $\eta$ 。

### 3 光纤参数与硼掺杂量关系的图例说明

为了更好地理解前面理论分析的结果,图3标

出了对应于 X-偏振模和 Y-偏振模的椭圆内包层折射率深度  $d_x, d_y$ ,纤芯-外包层相对折射率差  $\Delta_x, \Delta_y$ ,以及不考虑应力双折射时的椭圆内包层折射率深度  $d$  和纤芯-外包层相对折射率差  $\Delta$ 。图4~8给出了光纤各主要参数与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的关系。从图4知,光纤结构参数  $a, b, d$  给定时,内包层折射率深度  $d_x, d_y$  与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的大小无关[见式(7a)和(7b)],因而由之确定的对应于 X-偏振模和 Y-偏振模的基模截止归一化频率  $\nu_x, \nu_y$  也与内包层硼掺杂量  $\eta$  无关(见图5)。图6中,  $\Delta_x, \Delta_y$  随内包层硼掺杂量  $\eta$  的增大而线性增大[见式(8b)],但其比值  $\Delta_y/\Delta_x$  与硼掺杂量  $\eta$  的大小无关[见式(8c)]。图7中, X-偏振模和 Y-偏振模的基模截止波长  $\lambda_x, \lambda_y$  与内包层硼掺杂量  $\eta$  的平方根成正比[见式(4a) (4b)和(8b)],但其比值  $\lambda_y/\lambda_x$  与内包层硼掺杂量  $\eta$  的大小无关,它只由光纤结构参数  $a, b, d$  确定,因而对于长 W-型单模单偏振光纤,其百分比带宽  $\text{Band} = 2(\lambda_x - \lambda_y)/(\lambda_x + \lambda_y)$  也与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的大小无关。图8中,截止基模能量损耗系数  $\alpha$  和单模单偏振消光比  $dB$  与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的平方根成正比[见式(10)],对于短

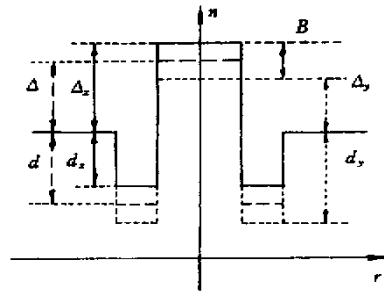


图3 W-型单模单偏振光纤折射率参数示意图  
Fig.3 Schematic diagram of W-tunneling optical fiber refractive index parameter

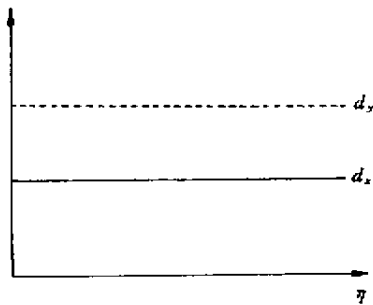


图4 内包层折射率深度  $d_x, d_y$  与硼掺杂量的关系  
Fig.4 Relationship between inner cladding refractive index depth and boron doped content

W-型单模单偏振光纤,增大椭圆内包层硼掺杂的含量,可以提高其单模单偏振消光比和有效带宽。这些图例清楚地说明了前面理论分析的结果。

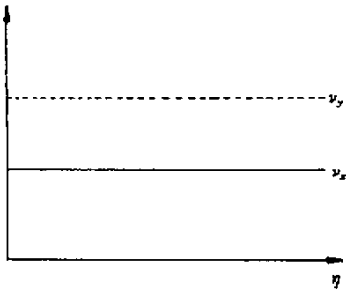


图5 基模截止归一化频率  $\nu_x, \nu_y$  与硼掺杂量的关系

Fig.5 Relationship between normalized cutoff frequency and boron doped content

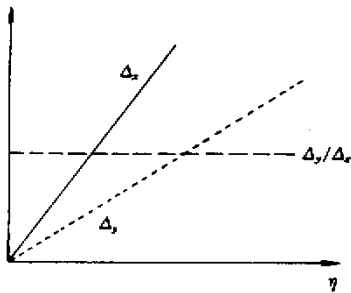


图6 纤芯-外包层相对折射率差  $\Delta_x, \Delta_y$  与硼掺杂量的关系

Fig.6 Relationship between relative refractive index difference and boron doped content

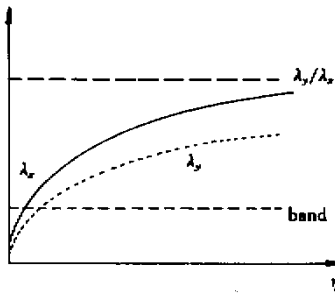


图7 基模截止波长  $\lambda_x, \lambda_y$  和百分比带宽 Band 与硼掺杂量的关系

Fig.7 Relationship of cutoff wavelength and percentage bandwidth with boron doped content

## 4 结论

本文分析了 W-型单模单偏振光纤的带宽 Band 与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的关系。得出了长 W-型单模单偏振光纤 ( $L \geq 1$  m) 的带宽与椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的大小无关,它只由光纤结构参数  $a, b, d$  确定。对于短 W-型单模单偏振光纤 ( $L \sim 1$  cm),

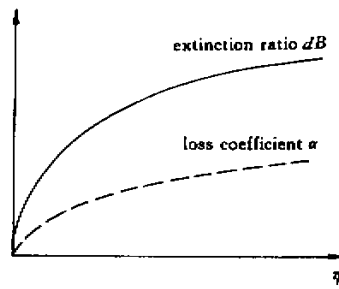


图8 截止基模能量损耗系数  $\alpha$  和单模单偏振消光比 dB 与硼掺杂量的关系

Fig.8 Relationship of loss coefficient and extinction ratio with boron doped content

由于单模单偏振消光比和椭圆内包层硼掺杂量  $\eta$  的平方根成正比,  $dB \propto \alpha \propto \sqrt{\eta}$ , 增大椭圆内包层硼掺杂量,可适度提高其消光比和有效带宽。这些结论为 W-型单模单偏振光纤制作工艺参数的选择提供了依据。以往通常认为,椭圆内包层硼掺杂量越高,产生的应力双折射越大,其带宽也越宽,实际上,硼掺杂量的增大,同时会加大椭圆内包层相对于纤芯的折射率下陷量,其综合效果并不能显著增加 W-型单模单偏振光纤的带宽,特别对于长 W-型单模单偏振光纤,其带宽就不受椭圆内包层硼掺杂量的影响。所以 W-型单模单偏振光纤的设计制造应根据光纤应用范围和长短的不同,选择合适的工艺参数和硼掺杂量,这样才能起到应有的效果。

此外应该注意的是,本文的结论是在弱导近似和弱掺杂的条件下得出的,如果超出这个范围,某些结论就应作一定的补充和修改。

## 参考文献

- 1 J. R. Simpson, R. H. Stolen, F. M. Sears *et al.*. A single-polarization fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1983, 1(2): 370 ~ 374
- 2 R. H. Stolen, W. Pleibel, J. R. Simpson *et al.*. Short W-tunneling fibre polarisers [J]. *Electron. Lett.*, 1988, 24(9): 524 ~ 525
- 3 Michael J. Messerly, James R. Onstott, Raymond C. Mikkelsen. A broad-band single polarization optical fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(7): 817 ~ 820
- 4 W. Eickhoff. Stress-induced single-polarization single-mode fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1982, 7(12): 629 ~ 631
- 5 Allan W. Snyder, Frank Ruhl. Single-mode, single-polarization fibers made of birefringent material [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, 73(9): 1165 ~ 1174
- 6 Ji Min-ning. Cutoff wavelengths of the fundamental modes in W-tunneling optical fibers [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, 27(5): 292 ~ 296