

# 极宽频带光纤和极宽频带通信系统

汪业衡

上海传输线研究所, 上海 200437

**摘要** 比较了关于光子晶体光纤的水平论述和关于靶向设计的极宽频带三包层单模光纤的观点。基于宏观麦克斯韦方程建立物理模型,提出了靶向设计方法。估算了极宽频带三包层单模光纤批量生产可以接受的公差。研究了服务于宽带中国国家战略的极宽频带光纤和极宽带通信系统。讨论了我国光纤产业的三项目标。

**关键词** 光纤光学; 微结构光纤; 光纤设计与制造; 光纤性能; 单模光纤

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.080606

## Ultra Broadband Optical Fibers and Ultra Broad Telecom Systems

Wang Yeheng

Shanghai Transmission Lines Research Institute, Shanghai 200437, China

**Abstract** The article concerning state-of-the-art of photonic crystal fibers is compared with that concerning ultra broadband single-mode triple-clad fibers (UBSM-TCF) optimized by target-oriented design method (TODM). A physical model and TODM are introduced based on macroscopic Maxwell equations. Acceptable tolerances of three control parameters for mass production of UBSM-TCF optimized by TODM are estimated. Ultra broadband optical fibers and ultra broadband telecommunication systems are studied to serve the national strategy of broadband China. Three targets of national optical fiber industry are discussed.

**Key words** fiber optics; microstructured fiber; fiber design and fabrication; fiber properties; single-mode fiber

**OCIS codes** 060.4005; 060.2280; 060.2400; 060.2430

## 1 引言

2013年8月17日网上发布了宽带中国国家战略。光纤宽带和宽带无线两大发展主线被定位为国家经济社会发展的战略性公共基础设施,成为关系到21世纪国家竞争力和创新能力的战略基石,对全民的生活方式和社会发展将带来根本的变化。宽带中国国家战略需要宽带通信系统,宽带通信系统需要宽带通信光纤。光子晶体光纤是近20年来国际光纤研究的主流趋势。本文以对照2012年Knight等发表的关于光子晶体光纤的水平论述<sup>[1]</sup>和作者于2013年8月发表的关于靶向设计的极宽频带三包层单模光纤的论文<sup>[2]</sup>为线索,回顾Knight等自1990年首次演示无限单模光子晶体光纤以来的历史,探索我国光纤产业科学发展的关键。

根据水平论述<sup>[1]</sup>,1990年首次演示的无限单模光子晶体光纤具有尺度可与波长比拟的类似于光子晶体的周期性结构包层,将阶跃型光纤当作物理模型和对比对象。与靶向设计的极宽频带三包层单模光纤<sup>[2]</sup>比较,它存在两个问题:

第一,阶跃型光纤无法产生漏泄模损耗从而避免反导波模;它作为物理模型违反无限单模特性的物理本质;它作为对比对象会造成“无限单模特性是光子晶体光纤的固有特性”的误解。产生这些问题的原因是:无限单模特性的物理本质多年之后才用分析任意形状光波导的径向等效介电常数方法揭示<sup>[3]</sup>,时隔多年才被一种实心芯线的微结构非零色散位移光纤所验证<sup>[4]</sup>。

水平论述<sup>[1]</sup>认为:光子晶体光纤或多孔光纤或微结构光纤等诸多名称无一能够严格地按照字面理解。论文<sup>[2]</sup>提出的极宽频带三包层单模光纤表明:名不正则言不顺。这些名称无一能够揭示无限单模特性的本质。研究光子晶体光纤存在盲人摸象的过程。

第二,可以与光波波长比拟的类似于光子晶体的周期性结构包层太复杂,其实没有必要。根据宏观麦

收稿日期: 2014-02-09; 收到修改稿日期: 2014-03-31; 网络出版日期: 2014-07-04

作者简介: 汪业衡(1940—),男,教授级高工,主要从事光纤理论方面的研究。E-mail: yhwang1940@sina.com

克斯韦方程的基本概念,这是显而易见的。

1991年 Vassallo<sup>[6]</sup>提出,宏观麦克斯韦方程由微观麦克斯韦方程经过平均处理得到。在微观麦克斯韦方程中,所有电荷被视作点函数或者在原子波尺度内的分布函数。平均处理完全清除了小于特征尺度  $\delta$  的快速空间变化,其中  $\delta$  可以在相当宽的范围内取任意值,但必须远大于典型原子或分子尺度(0.1 nm 量级)。电荷、电流和场的高度奇异的原子尺度分布被平滑的宏观场分布所取代,后者可以用任意可高阶微分的函数描述。 $\delta$  与相关的宏观尺度  $\Lambda$  相比必须足够小,才能使宏观尺度  $\Lambda$  的细节不至因平均处理而模糊。宏观尺度可以和波长比拟的光纤,在  $\Lambda$  远大于  $\delta$  和  $\delta$  远大于 0.1 nm 量级的双重条件下适用宏观麦克斯韦方程。

三包层光纤尺度可以和波长比拟,满足双重条件,光子晶体光纤中所有小于特征尺度  $\delta$  的快速空间变化已经被平均处理。基于场函数的任意可高阶微分的靶向设计方法可以使任意可获得的三包层光纤结构和性能最佳,具有类似于无限单模特性的极宽频带单模特性。

水平论述<sup>[1]</sup>指出:光子晶体光纤可以改变光的发生、传送和应用的方法;超连续谱的产生,四波混频和带隙型空心光子晶体光纤有可能孕育科学的突破。但目前基于上述应用的商品仍需手工操作,并且只能少量制作,设计和调制很复杂,从基础研究应用转型到工程应用还需要付出艰辛的努力。论文<sup>[2]</sup>提出的用于靶向设计的极宽频带三包层单模光纤,获得与无限单模光子晶体光纤类似的性能简单得多。

论文<sup>[2]</sup>发表后,作者用靶向设计方法估算了极宽频带三包层单模光纤批量生产可以接受的公差。靶向设计方法使批量生产程序化、简单化,和水平论述<sup>[1]</sup>介绍的国外带隙型空心光子晶体光纤的设计制造原理不谋而合。

该项研究得益于基于光纤麦克斯韦方程研究的上述新成果。计划内的光子晶体光纤研究从群众运动的高潮走向产业界的无果而终。满足于简单的模仿,没有深入的理论研究,与光子晶体光纤研究国际潮流渐行渐远<sup>[7-8]</sup>。

研究表明,顺应光子晶体光纤的国际研究潮流,研制和批量生产极宽频带通信系统所需要的极宽频带三包层单模光纤,不仅可以服务于国家战略,而且有助于光纤产业实现如下三项目标:

第一:结束从 2003 年 7 月 1 日对 G.652 光纤反倾销到 2014 年 3 月 19 日对光纤预制棒反倾销调查的历史,使中国的光纤制造不再受制于人。

第二:促进转型发展。“八纵八横”光缆干线建设于 1986 年到 1998 年这一时期,由于光缆的理论使用期限为 20 年,所以需要就目前的光缆干线进行更新换代;领海需要更换新的海底长途光缆系统;亿万光纤到户用户有待提高下载速度。

第三:有助于极宽频带光纤和极宽频带通信系统进入世界先进的行列。以极宽频带三包层光纤作为长途通信光纤,以 2  $\mu\text{m}$  波长全光纤可调谐激光器作为光源<sup>[9]</sup>,用三包层光纤器件或光子晶体器件操纵和控制光波传播,组成极宽频带通信系统,有望在带隙型空心光子晶体光纤之前投入实用;长途人造周期性材料的实际应用还有很长的路要走。

为了进一步说明原理,本文不拟重复叙述论文<sup>[2]</sup>,而是从宏观麦克斯韦方程的一个基本概念出发。第一,说明靶向设计的极宽频带三包层单模光纤的理论根据。第二,说明靶向设计方法可以使批量生产程序化、简单化,这与水平论述<sup>[1]</sup>介绍的国外带隙型空心光子晶体光纤的设计制造原理不谋而合。

当然,某些周期性结构的光子晶体光纤仍然是重要的,例如带隙型空心光子晶体光纤就是一个激动人心的研究项目。当尺度比波长小很多时,宏观麦克斯韦方程不再适用,周期性结构的纳米光子晶体器件对于极宽频带通信系统不可或缺。在涉及非线性应用时,宏观麦克斯韦方程也不再适用。

## 2 三包层单模光纤的极宽频带特性

### 2.1 无限单模光子晶体光纤的一维模型

试考察尺度可以和波长比拟的一维光子晶体。在此情况下,按照宏观麦克斯韦方程,所有小于特征尺度  $\delta$  的快速空间变化已被平均处理清除。按照无限单模特性的物理本质,图 1 所示的三包层光纤可以作为无限单模光子晶体光纤的一维模型。

凹陷三包层光纤中,纤芯、凹陷包层和凸起包层分别有外半径  $a$ ,  $r_1$  和  $r_2$ ; 折射率  $n_{co}$ ,  $n_1$  和  $n_2$ ; 相对折射率

差  $\Delta_{co}$ ,  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$ ; 均匀外包层的折射率是  $n_{cl}$ , 其中  $n_{co} > n_{cl}$ 。

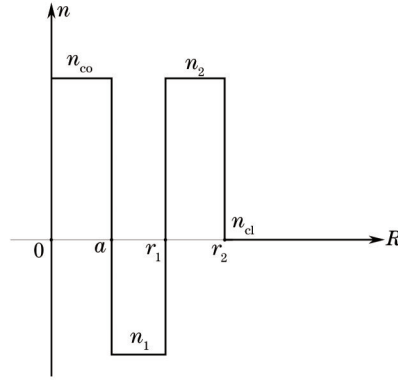


图1 无限单模光子晶体光纤的一维模型

Fig.1 One dimensional model of endlessly single-mode photonic crystal fiber

$\Delta$  参数定义为:

$$\Delta_{co} = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2}, \Delta_1 = \frac{n_1^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2}, \Delta_2 = \frac{n_2^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2}. \quad (1)$$

为便于计算, 使用如下结构变量:

$$h_1 = \frac{r_1 - a}{a}, h_2 = \frac{r_2 - r_1}{a}, p_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_{co}}, p_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_{co}} \quad (2)$$

$$x_1 = a, x_2 = h_1, x_3 = h_2, x_4 = \Delta_{co}, x_5 = p_1, x_6 = p_2.$$

当  $h_1 p_1 + h_2 p_2 < 0$  和  $1 + h_1 p_1 + h_2 p_2 > 0$  时, 三包层光纤中光以改进的全内反射方式传播。其中  $h_1 p_1 + h_2 p_2 < 0$  可以提供极宽频带特性所需要的漏泄损耗,  $1 + h_1 p_1 + h_2 p_2 > 0$  则保证避免反导波模。

当  $h_1 p_1 + h_2 p_2 > 0$  或  $h_1 p_1 + h_2 p_2 = 0$  时, 三包层光纤中光以全内反射方式传播。

当  $h_1 p_1 = 0$  和  $h_2 p_2 = 0$  时, 阶跃型光纤中光以全内反射方式传播, 不能提供漏泄损耗<sup>[2]</sup>。需要注意的是, 该光纤作为光子晶体光纤的物理模型和对比对象, 违反了无限单模特性的物理本质, 造成“无限单模特性是光子晶体光纤的固有特性”等一系列误解, 并且改进的全内反射被误解为全内反射。

需要特别说明的是, 在这个物理模型中, 也可以用  $p_2 = 1.0$  的光纤作为初始光纤, 通过靶向设计方法迭代地设计  $p_2 < 1.0$  的极宽频带单模三包层光纤。后者可能更容易制造, 在此不再赘述。

## 2.2 靶向设计方法的数学原理

在宏观麦克斯韦方程中场函数是可任意高阶微分的。靶向设计方法通过标量波动方程和场函数微积分运算的结合, 可以使任意可获得的三包层光纤的结构和性能最佳, 从而适应无限单模特性这一光纤性能的巨大飞跃。

靶向设计方法的核心是导数矩阵方程形式的全微分展开式:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \frac{\partial y_1}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \frac{\partial y_2}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_1} & \frac{\partial y_n}{\partial x_2} & \frac{\partial y_n}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial y_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $x_1, x_2, \dots, x_m$  和  $y_1, y_2, \dots, y_n$  分别是初始光纤的结构变量和性能变量;  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$  和  $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$  分别是靶光纤对应的结构变量和性能变量的增量。

导数矩阵方程作为初始光纤和靶光纤之间的反馈环节, 构成具有任意可获得结构与性能的光纤系统。迭代地构造和求解导数矩阵方程, 可以在计算机上高效优化光纤结构和性能。

优化结构和性能包含正问题和逆问题。正问题给定结构变量  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$ , 算出性能变量  $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$ ; 而逆问题则给定性能变量  $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$ , 算出结构变量  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$ 。靶向设计方

法的一个突出优点是,逆问题的求解无需十分复杂的专用程序。

三包层光纤有6个结构变量。设定两个固定的离散参数  $p_1$  和  $p_2$ , 导数矩阵方程的规模不大于  $4 \times 4$ , 具体情况根据所需修正的变量数目而定。

选择适当的优化参数, 可以按照光纤演变的规律获得最佳性能与最佳结构。

当  $m > n$  时, 有  $m - n + 1$  个解, 根据经验选择最容易实现的结构, 可以实现人机的良好结合。

初始光纤可以是任意可获得的三包层光纤, 也可以是上一个环节的靶光纤。初始光纤迭代地改进成为靶光纤, 直至收敛。不同的初始光纤和靶光纤的最终收敛值一致。

### 2.3 靶向设计的极宽频带单模三包层光纤

由于在宏观麦克斯韦方程中光纤性能连续并且可无穷高阶微分, 靶向设计的极宽频带单模三包层光纤具有最佳性能和结构, 理论上最接近无限单模光子晶体光纤, 此前一些传统光纤仅仅是其特例。微积分发明之前的力学理论和麦克斯韦方程提出之前的电磁场理论, 早已提供诸多类似例证。

在靶向设计方法中, 性能和结构按照光纤演变的规律依次逐步逼近最佳。色散性能优化的顺序是: 在某最小工作波长  $\lambda_{\min}$  下初始色散斜率  $S_0$  的优化, 相对凹陷深度  $p_1$  的优化, 最小工作波长  $\lambda_{\min}$  和工作波长范围的优化。给定  $\lambda_{\min}$  下的最小色散  $D_{\min}$  和有效面积  $A_{\text{eff}}$  应避免或充分减小四波混频失真和非线性失真。由此可以看出:

$S_0$  最佳的单模光纤, 其单调上升的色散特性优于色散平坦光纤和非零色散位移单模光纤, 在给定带宽内色散变化最小, 光以改进的全内反射方式传播。

$S_0$  优化的光纤相对凹陷深度  $p_1$  可以在相当大的范围内变化。

远离 1300 nm 的  $\lambda_{\min}$  适于极低色散斜率的色散平坦光纤。有两个  $\lambda_0$  的三包层色散平坦光纤 40 年来一直未获商业应用<sup>[7-9]</sup>, 是因为  $S_0$  和  $\lambda_{\min}$  远离最佳值。

新颖的色散平坦光纤的最小工作波长与现有非零色散位移单模光纤接近, 兼有极宽频带、色散平坦、宏弯损耗低、对弯曲不敏感等优点。

图2所示是  $S_0$  最佳的三包层光纤在 1460~1700 nm 波长范围内色散特性随  $p_1$  演变的情况。其中  $p_2 = 1.0$ , 图中曲线自上而下分别是  $p_1 = -0.367, -0.486, -0.621, -0.876$  和  $-1.413$  时光纤的色散特性。在 1550 nm 处  $A_{\text{eff}}$  为  $60 \pm 0.4 \mu\text{m}^2$ , 在 1460 nm 处最小色散大于  $2.0 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。

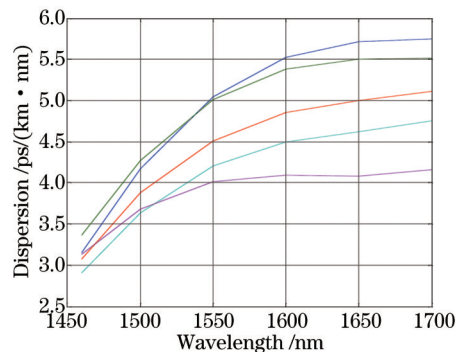


图2  $S_0$ 最佳的三包层光纤在 1460~1700 nm 内的色散特性

Fig.2 Dispersion characteristics of TCF with optimum  $S_0$  in 1460~1700 nm

## 3 靶向设计的极宽频带单模三包层光纤的批量生产

按照论文<sup>[2]</sup>, 靶向设计的极宽频带三包层光纤满足改进的全内反射条件,  $\Delta h_1 \leq 6\%$  时的极宽频带特性与实心微结构光纤无公差时的无限单模特性类似, 最佳结构可以避免高次模, 减小宏弯损耗。因为三包层光纤有6个结构参数, 并且公差要求  $\Delta h_1 \leq 6\%$  过于严格, 按照传统方法, 这种光纤无法批量生产。然而它满足  $h_1 p_1 + h_2 p_2 < 0$  和  $1 + h_1 p_1 + h_2 p_2 > 0$  的条件, 6个结构参数并非完全独立, 只需要分别控制与纤芯、凹陷包层和突出包层有关的三个变量即可, 它们分别是:  $\Delta_{\text{co}} a$ 、 $\Delta_{\text{co}} a h_1 p_1$  以及  $\Delta_{\text{co}} a h_2 p_2$ 。

在图2所示光纤系统中, 当  $p_1 = -0.367$  和  $p_2 = 1.0$  时,  $a = 3.362 \mu\text{m}$ ,  $h_1 = 1.608$ ,  $h_2 = 0.251$ ,  $\Delta_{\text{co}} = 0.00381$ ; 当

$p_1=-1.413$  和  $p_2=1.0$  时,  $a=3.952 \mu\text{m}$ ,  $h_1=0.572$ ,  $h_2=0.351$ ,  $\Delta_{co}=0.00377$ 。从  $p_1=-0.367$  和  $p_2=1.0$  变化到  $p_1=-1.413$  和  $p_2=1.0$ ,  $\Delta_{co}a$ 、 $\Delta_{co}ah_1p_1$  和  $\Delta_{co}ah_2p_2$  分别增加了 17%、60% 和 63%。如下三组控制参数的公差可以收敛于优化的色散性能:

1) 如果在批量生产中只容许负公差,设计选取  $p_1=-1.413$  的光纤结构参数,  $\Delta_{co}a$ 、 $\Delta_{co}ah_1p_1$  和  $\Delta_{co}ah_2p_2$  的公差分别为 -15%、-38% 和 -39%。

2) 如果在批量生产中容许正负公差,在  $p_1=-0.621$  和  $-0.876$  之间取平均值,按它的结构参数设计,  $\Delta_{co}a$ 、 $\Delta_{co}ah_1p_1$  和  $\Delta_{co}ah_2p_2$  的公差分别为  $\pm 8\%$  与  $-7\%$ ,  $\pm 27\%$  与  $-20\%$  和  $\pm 30\%$  与  $-20\%$ 。

3) 如果在批量生产中只容许正公差,设计选取  $p_1=-0.367$  的光纤结构参数,  $\Delta_{co}a$ 、 $\Delta_{co}ah_1p_1$  和  $\Delta_{co}ah_2p_2$  的公差分别为 +17%、+60% 和 +63%。

$\Delta_{co}$  的公差调节通过掺杂可以控制,  $a$  的公差调节通过拉丝可以控制。按照 2010 年 7 月 ITU-T 关于 G.656 光纤的建议,  $a$  的公差约小于  $\pm 0.8\%$ , 因而保证上述  $\Delta_{co}a$  的公差比较容易。

根据论文<sup>[2]</sup>, 窄带的第一类三包层光纤在  $\Delta h_1 \leq 30\%$  的文件下可以避免高阶模。 $p_2=1.0$  的纯硅包层可以实现, 从而保证上述  $\Delta_{co}ah_1p_1$  和  $\Delta_{co}ah_2p_2$  的公差也是可能的。

综上所述, 通过对上述三个变量的公差控制理论分析, 批量生产是可以接受的。

水平论述<sup>[1]</sup>介绍, 对于小量生产和批量生产性能不同的光子晶体光纤, 例如带隙型空心光子晶体光纤, 即使采用数值设计方法也不精确。即使最好的生产流程也有自然的变化, 会破坏获得某一光纤响应所需要的精细的平衡。制造性能稍有不同的一族光纤则比较容易, 测试其性能, 就可以选择一个最接近目标的光纤。

靶向设计方法应用于批量生产, 就是从光纤结构参数系统得到光纤性能参数系统。在结构参数系统中  $p_1$  可从  $-0.367$  变化到  $-1.413$ , 公差范围较为宽松。 $S_0$ 、 $p_1$  和  $\lambda_{\text{min}}$  经过优化, 可由性能差异不大的光纤组成系统。通过以上分析, 可以看出设计所取结构参数与靶光纤的性能参数并不对应, 这种差异的产生与生产流程有关。

靶向设计使极宽频带三包层单模光纤的批量生产程序化、简单化, 原理与国外带隙型空心光子晶体光纤的设计制造方法不谋而合。设计和生产新颖的光纤理所当然要用新颖的方法, 而不能用只适合于单个 G.652 光纤的传统方法, 因为无限单模特性是光纤性能的巨大飞跃。

## 4 结 论

基于宏观麦克斯韦方程的理论研究表明, 靶向设计的极宽频带三包层单模光纤兼有极宽频带、色散平坦、宏弯损耗低、对弯曲不敏感等优点而无需类似光子晶体的复杂结构。靶向设计方法使新颖光纤批量生产程序化、简单化, 原理与国外带隙型空心光子晶体光纤的设计制造方法不谋而合。顺应光子晶体光纤研究的国际潮流, 研制和批量生产宽频带通信系统所需要的极宽频带三包层单模光纤, 不仅可以服务于宽带中国国家战略, 而且有助于光纤产业实现三项目标: 结束 2003 年以来光纤和预制棒反倾销的历史; 促进转型发展; 有助于极宽频带光纤和极宽频带通信系统进入世界先进的行列。

## 参 考 文 献

- 1 Wadsworth W, Knight J, Birks T. State-of-the-art photonic crystal fiber[J]. Optics & Photonics News, 2012, 23(3): 24-31.
- 2 Wang Y H. Target-oriented design method for ultra broadband single-mode triple clad fibers[J]. Appl Opt, 2013, 52(24): 5880-5887.
- 3 Rastogi V, Chiang K S, Holey optical fiber with circularly distributed by the radial effective-index method[J]. Opt Lett, 2003, 28(24): 2449-2451.
- 4 Ghosh D, Roy S, M Pal S, et al.. Modeling of microstructured nonzero dispersion shifted optical fibers with ultralow dispersion slope[J]. J Opt Soc Am B, 2009, 26(2): 337-345.
- 5 Vassallo C. Optical Waveguide Concepts[M]. Amsterdam: Elsevier, 1991.
- 6 Li Z, Alam S U, Jung Y, et al.. All-fiber, ultra-wideband tunable laser at  $2 \mu\text{m}$  [J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4739-4742.

- 
- 7 Kawakami S, Nishida S. Anomalous dispersion of new doubly clad optical fiber[J]. Electron Lett, 1974, 10(4): 38-40.
- 8 Francois P L, Alard F, Bayon J F, *et al.*. Multimode nature of quadruple- clad fibers[J]. Electron Lett, 1984, 20(1): 37-38.
- 9 Ainslie B J, Day C R. A review of single mode fibers with modified dispersion characteristics[J]. J Lightwave Technol, 1986, 4(8): 967-979.