

新型光学聚合物——Topas 环烯烃共聚物微结构光纤的设计及特性分析^{*}

王豆豆 王丽莉[†]

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2009 年 8 月 7 日收到; 2009 年 8 月 20 日收到修改稿)

以新型光学聚合物 Topas 环烯烃共聚物(折射率为 1.53)为基质, 设计了四种微结构聚合物光纤. 应用有限元方法对各种光纤在波长 0.5—2.0 μm 范围内的基模有效折射率、模场面积和数值孔径进行了计算. 研究了结构参数对模场分布、单模特性和色散特性的影响. 得出了具有极大/小模场面积、无限单模传输和平坦近零色散的光纤结构参数. 与石英、聚甲基丙烯酸甲酯基质的微结构光纤相比, 该光纤具有更大的数值孔径和较宽的平坦近零色散范围. 为光纤的制备提供了理论指导.

关键词: 微结构聚合物光纤, 有限元方法, 传输特性, Topas 环烯烃共聚物

PACC: 4270J, 4281D, 4281F

1. 引 言

最近出现了一种新型光学聚合物材料——Topas 环烯烃共聚物(Topas COC). 与聚合物光纤(polymer optical fiber, POE)惯用的基质材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)和聚苯乙烯(PS)等相比, 这种新型的聚合物材料中不含残余单体, 具有低密度、高折射率、高光学透光率、大的 Abbe 数、低双折射、极低的吸水率(约为 PMMA、PC 的 1/10)以及耐热性能好、热膨胀系数低、化学性能稳定、耐酸碱性能、机械性能优良等诸多优点^[1-3]. 这些性能使其成为制备微结构聚合物光纤(microstructured polymer optical fiber, MPOF)^[4]的优良基质材料.

MPOF 具备微结构光纤或光子晶体光纤的一系列新奇特性, 如无限单模传输, 极大或极小的模场面积, 高模式双折射以及超宽带平坦色散等^[5,6]. 这些传统光纤所无法比拟的特性使其在理论研究^[7,8]和实验制备^[9,10]方面都备受关注. 此外, 与微结构石英光纤相比, MPOF 因具有加工温度低、预制棒的制备方法灵活多样、成本低和基质材料种类多等优点而引起了国内外科研工作者极大的关注^[11-13]. 在

我们以前的文章中, 对 MPOF 预制棒的制备以及在光纤传像、光纤传感等方面进行了大量的理论和实验研究^[14-16]. 然而, 大多数的研究都是针对 PMMA 基质的微结构光纤. 在制备 PMMA 基质 MPOF 时, 遇到的一个主要问题就是材料中常常存在残余单体以及其高吸水性, 使得在拉制光纤时极易产生气泡, 导致光纤中出现致命的结构缺陷. 采用 Topas COC 这种新型光学聚合物材料作为光纤基质, 为解决 MPOF 技术中这一根本问题提供了契机. 以 Topas COC 为基质的 MPOF, 实验方面仅有对简单结构的 MPOF 用于光纤传感的研究^[17], 理论方面的研究尚未见报道.

作者所在课题组将对 Topas COC 基质的 MPOF 进行系统研究. 作为其中的第一步, 本文通过改变包层中空气孔的相对尺寸, 设计了四种三角形结构的 MPOF, 应用有限元方法(finite element method, FEM)计算了各种结构的 MPOF 在波长 0.5—2.0 μm 范围内的基模有效折射率 n_{eff} 、有效模场面积 A_{eff} 和数值孔径 NA, 研究了结构参数对模场分布、单模特性和色散特性的影响, 并与石英、PMMA 基质微结构光纤的实验及理论计算结果进行了比较, 以便为实验研究提供理论指导.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号:60437020)和国家高技术研究发展计划(863)(批准号:2007AA032452)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wangll@opt.ac.cn

2. 理论模型

本文设计的 MPOF 的端面结构如图 1 所示,在 Topas COC 基质中,三角形排列的三圈空气孔构成光纤包层,中心处缺少一个空气孔的实心高折射率缺陷区构成纤芯. 两个重要的设计参数是空气孔直径 d 和相邻空气孔间距 Λ , 通过取不同的孔径孔距比值 d/Λ 来设计不同横截面分布的 MPOF, 进而研究结构参数对传输特性的影响.

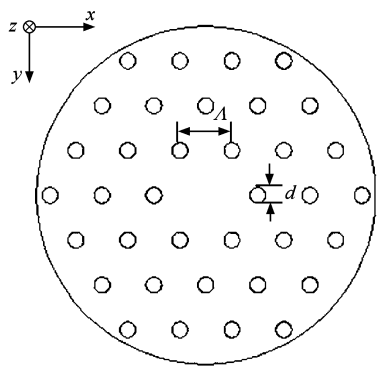


图1 三角形结构 MPOF 横截面示意图

FEM 可对光纤中的模场分布和传输特性进行非常精确的计算,尤其是适用于任意横截面形状和任意折射率分布的特性,使之成为分析微结构光纤极为有效的理论方法. FEM 首先将光纤横截面划分为有限个互不重叠的三角形或四边形小单元,将离散的麦克斯韦方程运用于每一个单元,在单元的边界处加上连续性条件,通过求解本征方程最终获得光场的分布和传输特性. 从麦克斯韦方程组出发,得出磁场 $\mathbf{H}$ 满足的波动方程

$$\nabla \times (n^{-2} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \mathbf{H} = 0, \quad (1)$$

其中 n 为折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数. 假设光波沿 z 轴传播并具有下面的形式:

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}(x, y, z) \exp[j(\omega t - \beta z)], \quad (2)$$

其中 ω 为角频率, β 为传播常数. 设光纤包层外边界处磁场为零,即满足理想磁导体边界条件

$$\mathbf{a}_n \times \mathbf{H} = 0, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{a}_n$ 为包层表面法向单位矢量. 光纤内部空气孔与基质材料界面处采用连续性边界条件以保证光场的连续性. 联立(1)–(3)式,理论上可以求出光纤横截面内的光场分布和传播常数 β . 从而求出与波长对应的模式(基模)有效折射率

$$n_{\text{eff}}(\lambda) = \frac{\beta}{k_0}. \quad (4)$$

由模式有效折射率 $n_{\text{eff}}(\lambda)$ 可以获得很多重要的特性(参数),如色散系数

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}(\lambda)}{d\lambda^2}, \quad (5)$$

其中 λ 为波长, c 为真空中的光速.

3. 计算结果与讨论

应用 FEM 研究了 $d/\Lambda = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ($\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$) 四种结构的 MPOF 在波长 $0.5\text{--}2.0 \mu\text{m}$ 范围内,模场分布、基模有效折射率 n_{eff} 和包层(空间填充基模)有效折射率 n_{FSM} 随传输波长和光纤结构的变化关系. 在此基础上计算了有效模场面积 A_{eff} 和数值孔径 NA, 对单模特性和色散特性进行了讨论.

研究表明,对于固定结构参数 d/Λ ,基模模场随 λ 的增加由纤芯向包层中扩散,如图 2(a) 所示;对于固定传输波长 λ ,基模模场分布随包层空气孔相对直径 d/Λ 的增加而趋于向中心集中,如图 2(b) 所示. 这与 Knight 等人的实验结果一致^[18].

基模有效折射率 n_{eff} 随传输波长和光纤结构的变化关系如图 3 所示,图中 Topas COC 的材料折射率 $n_{\text{COC}}(\lambda)$ 由 Sellmeier 公式^[3]求出,即

$$n_{\text{COC}}(\lambda) = \left(A_1 + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - A_3} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

其中 A_1, A_2, A_3 为常数. 由图可知, n_{eff} 小于材料折射率 n_{COC} , 随传输波长和 d/Λ 的增加而减小.

通过电场强度在光纤横截面内的分布 $E(x, y)$ 可以计算出有效模场面积 A_{eff} ^[19], 即

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}. \quad (7)$$

A_{eff} 随波长的变化关系如图 4 所示. 对于各种结构, A_{eff} 都随波长的增加而增加. 空气孔直径较大的光纤 ($d/\Lambda = 0.5$) 具有极小的模场面积 ($6\text{--}8 \mu\text{m}^2$), 表明模场被很好地限制在纤芯中, 增强了光纤的抗弯曲性能. 这与其他理论(超格子法)的研究结果一致^[19]. 按照该结论, 通过合理设计结构参数, 可以获得极大或极小的 A_{eff} , 分别用来减小或增强光纤中的非线性效应.

数值孔径 (numerical aperture, NA) 是表示光纤

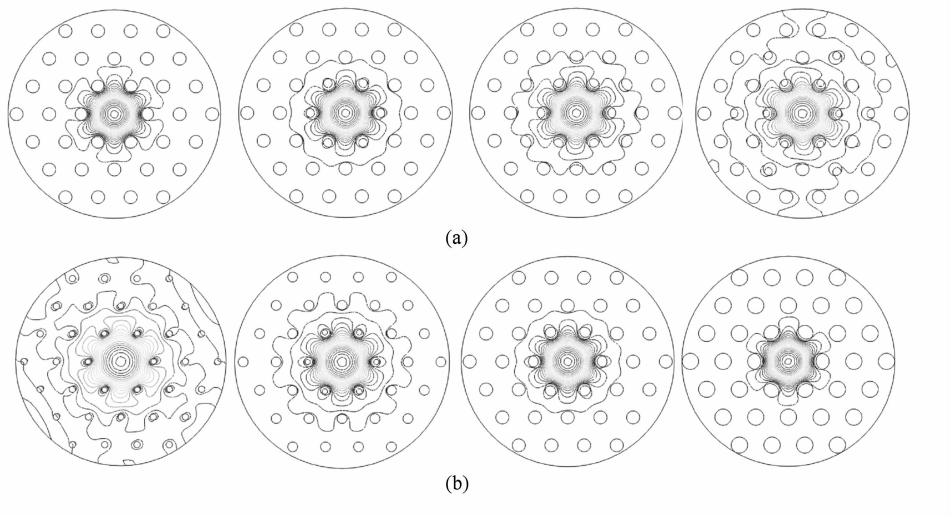


图2 模场分布随传输波长和光纤结构的变化 (a)由左到右分别为 $\lambda = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \mu\text{m}$ 的电场分布等高线图 ($d/\Lambda = 0.4$) ; (b)由左到右分别为 $d/\Lambda = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 的电场分布等高线图 ($\lambda = 0.8 \mu\text{m}$)

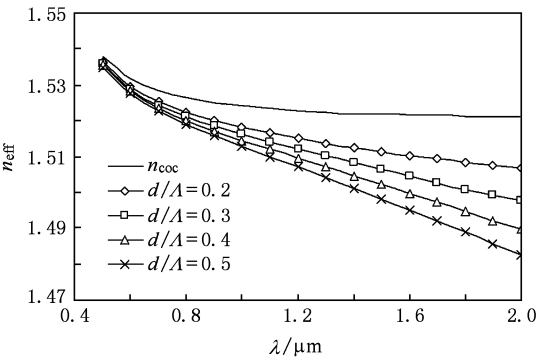


图3 基模有效折射率 n_{eff} 随传输波长的变化关系

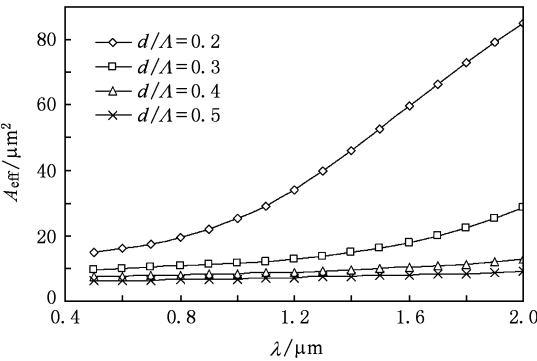


图4 有效模场面积 A_{eff} 随传输波长的变化关系

集光性能的一个重要参数,纤芯和包层的相对折射率差越大,NA 就越大,光纤的集光性能越好. 与石英和 PMMA(折射率分别为 1.45 和 1.49)相比,以 Topas COC 为基质的 MPOF 由于折射率(1.53)高而

具有更大的 NA. 本文采用下面的公式计算 NA:

$$\text{NA} = \sin\theta = \sin\left(\tan^{-1} \frac{\lambda}{\pi w_{\text{eff}}}\right), \quad (8)$$

其中 θ 为光束扩散角,由高斯光束的传播理论可以求出^[20], w_{eff} 为模场半径. NA 随波长的变化关系如图 5 所示. 对于固定波长,NA 随 d/Λ 的增加而增加,表明光纤接收光的能力随空气孔直径的增加而增强;在短波长(0.5—1.3 μm) 范围内,NA 均随波长的增加线性增加,这与 Knight 等人对石英基质微结构光纤的实验结果相一致^[18].

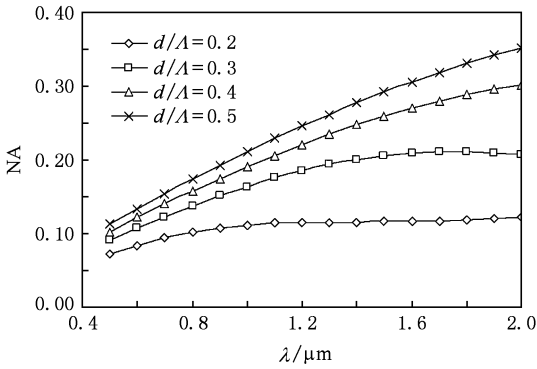


图5 数值孔径 NA 随传输波长的变化关系

基于以上参数,对光纤的单模特性和色散特性进行了研究. 首先定义一个非常有用的参数:有效归一化频率 V_{eff} ^[20],即

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi a_{\text{eff}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{FSM}}^2}, \quad (9)$$

其中 $a_{\text{eff}} = \Lambda/\sqrt{3}$ 表示有效纤芯半径, n_{co} 为纤芯折

射率, n_{FSM} 为包层(空间填充基模)有效折射率, 定义为不存在纤芯(无中心缺陷)时无限大周期性包层结构中的基模有效折射率, 通过 FEM 计算一个周期单元中的最大有效折射率求出. 由于 n_{FSM} 是与波长有关的量, 所以该公式已经考虑了微结构光纤的特性, 尽管其数学形式类似于传统单模光纤. 当 $V_{\text{eff}} < 2.405$ 时, 光纤单模运行. 如图 6 所示, V_{eff} 随波长的增加而减小, 只有 $d/\Lambda = 0.5$ 这种结构的 MPOF 在传输波长小于 $0.8 \mu\text{m}$ 时出现高阶模; 其他三种结构($d/\Lambda = 0.2, 0.3, 0.4$) 的 MPOF 都可实现“无限单模传输”. 可以解释为: 随着波长减小, 模场分布向折射率较高的中心区域集中, 使得包层有效折射率增加, 纤芯和包层的有效折射率差减小, 在一定程度上抵消了波长减小对 V_{eff} 的影响.

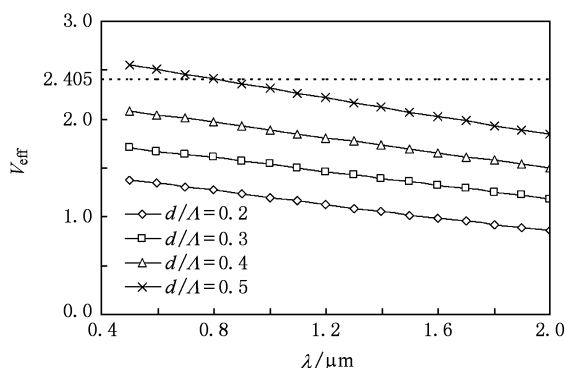


图 6 有效归一化频率 V_{eff} 随传输波长的变化关系

色散系数 $D(\lambda)$ 是描述光纤传输特性的一个重要参数. 对于单模 MPOF, 色散主要来源于材料色散 $D_{\text{M}}(\lambda)$ 和波导色散 $D_{\text{W}}(\lambda)$. 由于计算 n_{eff} 时已经考虑了材料色散的影响, 由(5)式求出的即为总色散. $D(\lambda)$ 随波长的变化关系如图 7 所示. 在短波长区域($0.5\text{--}0.8 \mu\text{m}$), 光纤结构对 $D(\lambda)$ 的影响较小. $d/\Lambda = 0.4, 0.5$ 这两种结构的 MPOF, 零色散波长分别在 $1.25 \mu\text{m}$ 和 $1.15 \mu\text{m}$ 附近. 与 PMMA 基质的 MPOF^[4] ($d/\Lambda = 0.46$, 零色散波长为 $1.35 \mu\text{m}$) 相比, 零色散点向短波长移动. 按照该结论, 合理设计结构参数可在特定波长处实现零色散. 各种结构的 MPOF 都具有较宽的平坦近零色散区域. 该特性对

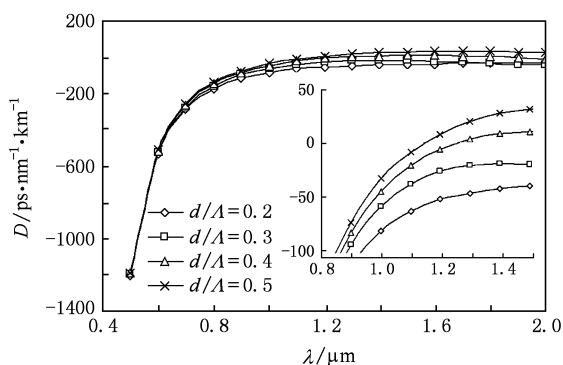


图 7 色散系数 D 随传输波长的变化关系(插图为 $0.8\text{--}1.5 \mu\text{m}$ 范围的局部放大)

于有效减小光波分复用系统中的四波混频效应具有重要意义, 是传统光纤所难以实现的.

4. 结 论

本文以新型光学聚合物材料 Topas COC 为基质, 设计了四种三角形结构的 MPOF. 应用有限元方计算了各种光纤在波长 $0.5\text{--}2.0 \mu\text{m}$ 范围内的基模有效折射率 n_{eff} 、有效模场面积 A_{eff} 和数值孔径 NA. $d/\Lambda = 0.5$ 的光纤具有极小的模场面积 ($6\text{--}8 \mu\text{m}^2$), 将能量很好地限制在纤芯中传播, 增加了光纤抗弯曲性能, 该特性亦可用于增强光纤中的非线性效应. 与石英和 PMMA 相比, 高材料折射率使该光纤具有更大的数值孔径. 对模场分布、单模特性和色散特性的研究结果表明, 模场分布随包层中空气孔相对直径 d/Λ 的增加或传输波长的减小, 呈现向中心集中的趋势, 这与实验结果符合的很好. 除了 $d/\Lambda = 0.5$ 的光纤在传输波长小于 $0.8 \mu\text{m}$ 时出现高阶模外, 其他三种光纤都呈现出无限单模传输特性. $d/\Lambda = 0.4, 0.5$ 这两种结构的光纤, 零色散波长分别在 $1.25 \mu\text{m}$ 和 $1.15 \mu\text{m}$ 附近. 与 PMMA 基质 MPOF 相比, 该光纤具有更小的零色散波长和较宽的平坦近零色散区域. 按照本文的结论, 合理选择结构参数, 结合 Topas COC 优良的光学性能和机械性能, 可用于指导实验设计出具有各种特殊性能的 MPOF.

[1] Topas COC brochure, Ticona Company, <http://www.Ticona.com>

[2] Jiang Y, Zou N Y 2002 *Polymer Optical Fiber* (Beijing: Chemical Industry Press) p64 (in Chinese) [江 源、邹宁

- 宇 2002 聚合物光纤 (北京: 化学工业出版社) 第 64 页]
- [3] Khanarian G, Celanese H 2001 *Opt. Eng.* **40** 1024
- [4] Eijkelenborg M A, Argyros A, Barton G, Bassett I M, Fellow M, Henry G 2003 *Opt. Fiber Technol.* **9** 199
- [5] Liu X Y, Zhang F D, Zhang M, Ye P D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 301 (in Chinese) [刘小毅、张方迪、张 民、叶培大 2007 物理学报 **56** 301]
- [6] Wang J, Lei N G, Yu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 946 (in Chinese) [王 健、雷乃光、余重秀 2007 物理学报 **56** 946]
- [7] Zhang F D, Liu X Y, Zhang M, Ye P D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6447 (in Chinese) [张方迪、刘小毅、张 民、叶培大 2006 物理学报 **55** 6447]
- [8] Fang X H, Hu M L, Li Y F, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2495 (in Chinese) [方晓惠、胡明列、栗岩峰、柴路、王清月 2009 物理学报 **58** 2495]
- [9] Guo T Y, Lou S Q, Li H L, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4742 (in Chinese) [郭铁英、娄淑琴、李宏雷、简水生 2009 物理学报 **58** 4724]
- [10] Zhou G Y, Hou Z Y, Li S G, Han Y, Hou L T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6486 (in Chinese) [周桂耀、侯峙云、李曙光、韩 颖、侯蓝田 2007 物理学报 **56** 6486]
- [11] Yu R J, Zhang B, Chen M Y, Huo L, Tian Z D, Bai X Z 2006 *Opt. Commun.* **266** 536
- [12] Zhang Y N 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5729 (in Chinese) [张亚妮 2008 物理学报 **57** 5729]
- [13] Argyros A 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 1571
- [14] Zhang Y N, Li K, Wang L L, Ren L Y, Zhao W, Miao R C 2006 *Opt. Express* **14** 5541
- [15] Wang J, Yang X H, Wang L L 2008 *Opt. Express* **16** 7703
- [16] Wang J, Wang L L 2009 *Appl. Opt.* **48** 881
- [17] Emilianov G, Jensen J B, Bang O, Hoiby P E, Pedersen L H 2007 *Opt. Lett.* **32** 460
- [18] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [19] Wang Z, Ren G B, Lou S Q, Jian S S 2003 *Opt. Express* **11** 980
- [20] Koshiha M, Saitoh K 2004 *Opt. Lett.* **29** 1739

Design and characteristics of novel optical polymer Topas COC-based microstructured optical fiber^{*}

Wang Dou-Dou Wang Li-Li[†]

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(Received 7 August 2009; revised manuscript received 20 August 2009)

Abstract

Four kinds of microstructured polymer optical fibers based on Topas cyclic olefin copolymer (COC) are designed. The effective index of the fundamental mode, the mode area and the numerical aperture are calculated by using the finite element method. Effects of structure parameters upon the mode field distribution, single mode property and dispersion property are discussed. Structure parameters corresponding to very large or very small effective mode area, endless single mode operation and flattened-near-zero dispersion are obtained. These fibers have larger numerical apertures compared with silica or PMMA based ones, and display flattened-near-zero dispersion.

Keywords: microstructured polymer optical fiber, finite element method, propagation characteristics, Topas COC

PACC: 4270J, 4281D, 4281F

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 60437020) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA032452).

[†] Corresponding author. E-mail: wangll@opt.ac.cn