第 27 卷 第 12 期
2007 年 12 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 27, No. 12
December, 2007

文章编号：0253-2239(2007)12-2123-5

内窥镜的红外激光传输用柔性空芯光纤的研制*

朱晓松[1] 周志云[2] 石艺尉[1]

(1 复旦大学信息科学与工程学院，上海 200433
2 上海理工大学 城市建设与环境工程学院，上海 200093)

摘要： 通过理论计算确立了多功能介质-金属结构空芯光纤的结构参量，优化了液相镀膜法的有关条件，明确了具体制作参量。制作了以聚碳酸酯毛细管为基管的，高柔韧性的，可同时低损耗传输红外目标波长激光和可见导航光红外的空芯光纤。对光纤传输性能进行了测试。在 2.94 μm 波长的 Er∶YAG 和0.63 μm 波长的红色半导体激光器的直线损耗分别为 0.4 dB/m 和 3 dB/m。组装在医疗内窥镜中的柔性空芯光纤，在先端以 0.9 cm 半径 135°角弯曲时，对 Er∶YAG 激光仍有近70%的传输效率；绿色导航光在内窥镜中的的损耗值为 11 dB，绿色指示点在内窥镜的视窗中清晰可见。结果表明此种光纤在内窥镜的激光传输方面有重要的应用价值。

关键词： 光纤光学；光波导；红外空芯光纤；液相镀膜；内窥镜；聚碳酸酯

中图分类号：TN252 文献标识码：A

Flexible Infrared Hollow Fiber Used in Endoscopic Laser Light Delivery

Zhu Xiaosong[1] Zhou Zhiyun[2] Shi Yiwei[1]

(1 *School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai* 200433
2 *College of Urban Construction and Environmental Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai* 200093)

Abstract: Low-loss and flexible hollow optical fibers were fabricated based on the polycarbonate capillary. Silver and cyclic olefin polymer films were innerly coated to enhance the reflectance at objective wavelengths. By optimizing the liquid-phase coating parameters, polymer layer obtained optimum thickness for simultaneous transmission for Er∶YAG and visible pilot beams. Polycarbonate capillary based hollow fibers are flexible and safe, which makes it possible to deliver infrared laser power in endoscopic application. The transmission losses are 0.4 dB/m and 3 dB/m for the 2.94 μm Er∶YAG laser and red visible laser, respectively. The transmittance of Er∶YAG laser light is about 70% and loss of visible pilot beam is 11 dB when the fiber was sharply bent with a bending radius as small as 0.9 centimeter and bending angle at 135°. Experimental results show that cyclic olefin polymer coated silver hollow polycarbonate fiber are suitable for the delivery of endoscopic laser and visible pilot beam.

Key words: fiber optics; optical waveguide; infrared hollow fiber; liquid-phase coating; endoscope; polycarbonate

1 引 言

在内窥镜中用于激光传输的多为石英光导纤维，因为石英光纤可以安全地应用于人体。

空芯光纤是一种有应用前景的红外光纤，在 2～10 μm的波长范围内对 Er∶YAG，CO 和 CO_2 激光可以有低损耗特性[1~5]，因此在红外激光的能量传输方面有重要应用。但绝大部分特性指标较好的空芯光纤均采用玻璃毛细管作为基管[6]。因为玻璃毛细管具有非常光滑的内表面，容易形成高质量的金属和介质薄膜。但在医疗现场使用时，由于操作

* 国家自然科学基金项目(60608013)资助课题。

作者简介：朱晓松(1976—)，上海人，讲师，理学博士，主要从事光学测量及空芯光纤等方面的研究。
E-mail：zhuxiaosong@fudan.edu.cn

导师简介：石艺尉(1963—)，江苏人，教授，博士生导师，主要从事传能光纤方面的研究。E-mail：ywshi@fudan.edu.cn

收稿日期：2007-01-19；收到修改稿日期：2007-06-25

失误而破损时会有玻璃碎片溅出。聚碳酸酯毛细管具有柔性好、安全等特点，是代替玻璃毛细管的有力候选材料之一[7]。采用聚碳酸酯毛细管作为基管，在内面镀金属银和环状丙烯树脂薄膜制作了高性能空芯光纤。制作过程中，根据理论计算结果，确立了多功能介质-金属结构空芯光纤的结构参量。然后根据结构参量优化了液相镀膜法的有关条件，明确各种规格的多功能空芯光纤中介质镀膜的具体制作参量。最后对制作的空芯光纤的传输性能进行了实验测量，实验结果证实其具有优越的柔韧性、低损耗特性、多功能和安全性，在医疗等领域有着广阔的应用前景。

2 介质-金属结构红外空芯光纤

2.1 多功能空芯光纤优化设计

在不考虑介质吸收时，介质-金属膜结构的空芯光纤获得最低损耗的介质膜厚度 d 为[8]

$$d=\frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n^2-1}}\arctan\left(\frac{n}{\sqrt[4]{n^2-1}}\right), \qquad (1)$$

其中 λ 是传输激光的波长，n 是介质膜的折射率。

图 1 是空芯光纤的损耗随介质膜厚度变化的计算结果。计算针对 HE_{11} 模式，介质膜的折射率为 1.53，空芯光纤的内径为 700 μm。图中的曲线分别对应波长为 2.94 μm 的 Er∶YAG 激光、波长为 0.63 μm和 0.53 μm 的红色和绿色激光。从图 1 中可以看到，与红色和绿色激光相比，Er∶YAG 激光有较大的膜厚误差容忍度。在 0.3～0.4 μm 的膜厚范围内，Er∶YAG 激光只有很小的损耗变化；在 Er∶YAG激光有低损耗特性的范围内，红色和绿色激光分别在膜厚为 0.29 μm 和 0.34 μm 处有损耗低谷。理论上可以对 Er∶YAG 激光的传输特性略作牺牲，可以同时低损耗传输红色或绿色激光。从实际制作的空芯光导纤维的传输特性来看，介质膜的微小变动对 Er∶YAG 激光的传输特性的影响几乎可以忽略不计。可以认为在几乎不影响 Er∶YAG 激光传输特性的情况下，可以任意选择某种颜色的可见激光作为导航光。

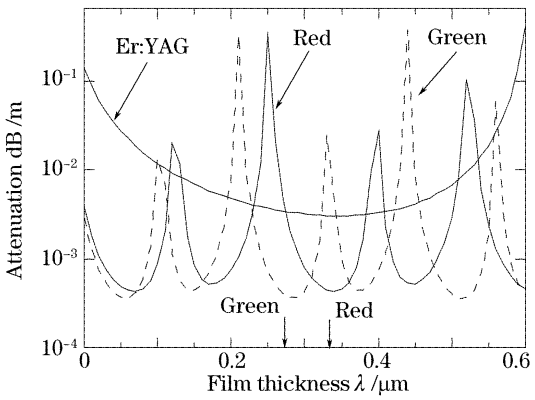


图 1 理论损耗与聚酯膜厚度的关系

Fig. 1 Theoretical losses as a function of polymer film thickness

2.2 优化制作参量

介质-金属膜结构的空芯光纤的制作有内面镀金属和镀介质两个关键工艺。金属膜要求表面光滑，介质膜则要求膜厚在最佳值并且表面光滑膜厚均匀以提高反射比降低损耗。在红外波段通常采用金属银作为金属膜，因为银在该波段有较高的反射率，也比较容易在各种管材上成膜。银的镀膜原理是银镜反应[9]。介质膜用环状丙烯树脂，采用液相法镀膜。使溶液以一定速度流过镀有银膜的毛细管，残留的液相膜被干燥后形成均一的光学薄膜。

图 1 的优化设计结果表明，介质膜厚的控制非常重要。流体力学的分析表明，液相镀膜法的膜厚 D 可以用下式表达[10]：

$$D=\left(\frac{aC}{200}\right)\sqrt{\frac{V\eta}{\gamma}}, \qquad (2)$$

式中 a 为毛细管内半径，C 为液相镀膜法中溶液浓度，V 为的溶液流速，η 为溶液黏度，γ 为溶液表面张力。

当采用的溶液一定时，流速是唯一的可调节参量。调节流速可以微调树脂膜厚，从而移动可见光低损耗窗口的位置。图 2 是根据实际制作结果总结的可见光低损耗窗口的波长与流速的关系。从图 2 可以看出，光纤内径越大所需流速越慢。对于内径 700 μm 的空芯光纤，在红色和绿色获得低损耗窗口的流速分别为 7 cm/min 和 12 cm/min。

根据优化条件制作的镀有银膜和环状丙烯树脂膜的空芯光纤损耗谱见图 3 所示。图 3(a)为光纤

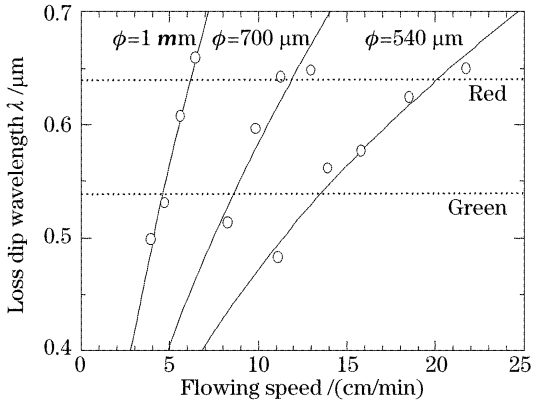


图 2 可见光低损耗窗口的波长与液相镀膜时流速的关系

Fig. 2 Wavelength of low loss dip as a function of flowing speed in the liquid-phase coating method

在中红外波段的损耗谱特性。激励光源是半峰全宽为 12°的高斯分布光源；图 3(b)为光纤在可见光和近红外波段的损耗谱特性。激励光源为半峰全宽为 10.5°的高斯分布光源。树脂的膜厚可以根据薄膜干涉峰的波长用下式估算[11]：

$$d = \frac{m\lambda_m}{4\sqrt{n^2-1}}, \tag{3}$$

其中 λ_m 是损耗谱中 m 阶干涉峰的波长，n 是介质膜的折射率。

利用(3)式估算图 3 中树脂的膜厚分别为 0.27 μm和 0.31 μm。该结果与图 1 中的设计结果略有差异，因为理论计算中没有考虑介质材料的色散。尽管介质膜厚有一些变化，在 3 μm 波长带其损耗特性几乎没有变化。需要说明的是，损耗谱中的损耗值较大。这是因为测量采用发散角很大的高斯光源激励。对于发散角很小的激光束其损耗很小。由图 3(b)可见由于膜厚的微调节，光纤分别在红色和绿色波长处有低损耗窗口。

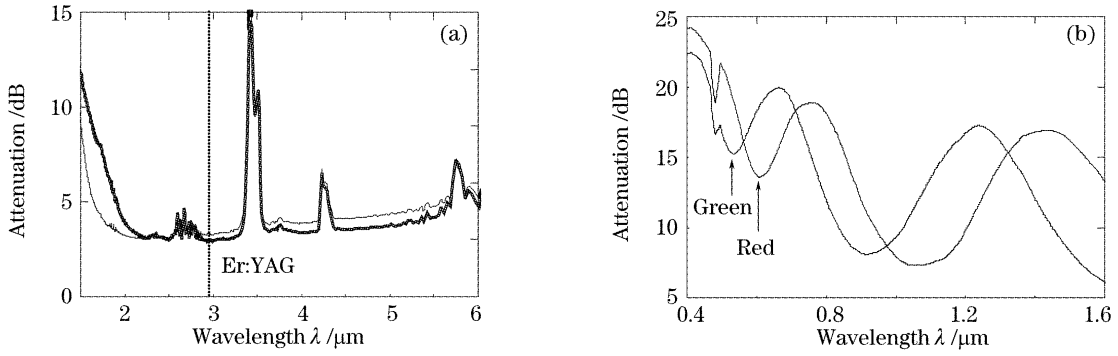


图 3　测得的空芯光纤传输损耗谱。(a)中红外区，(b)可见和近红外区

Fig. 3　Measured transmission loss spectra of hollow fibers. (a) In mid-infrared region, (b) in visible and near infrared regions

2.3　激光传输特性

由于光在介质-金属结构的空芯光纤内面不是全反射，存在由弯曲引起的附加损耗并且与曲率成正比。对图 3 中的光纤用实际激光器进行了弯曲传输特性测试。图 4 为空芯光纤对 Er∶YAG 激光的弯曲损耗特性。Er∶YAG 激光器的输出为100 mJ/pulse，脉冲宽度 350 μm，脉冲频率 10 Hz。测试光纤长度 1 m、内径 700 μm。测试中，入射端 30 cm 保持直线剩余 70 cm 按一定曲率半径弯曲。光纤的直线损耗约为 0.4 dB(传输效率大于 90%)。当光纤以曲率 20 (弯曲半径 5 cm)时，光纤已经被绕成 2 周，仍然有近 60%的传输效率(损耗为 2.5 dB)。其柔韧性和弯曲损耗可以满足绝大多数医疗或工业的实际应用。

图 5 为光纤的导航光的弯曲损耗特性。测试中，光纤的输出端以不同的弯曲半径弯成 180°或 90°，其损耗分别约为 7 dB 和 5 dB。与 Er∶YAG 激光相比，导航光的损耗明显较高。但可见导航光的功能为指示红外激光的照射点，5～7dB 的损耗是可以接受的。绿光的损耗略高于红光，主要因为短波长光对表面的粗糙更加敏感。小弯曲半径的损耗略低于大弯曲半径是的损耗。这是因为输出端以较小半径弯曲时，所需要的反射次数减少。

采用聚碳酸酯毛细管作为基管使空芯光纤具有

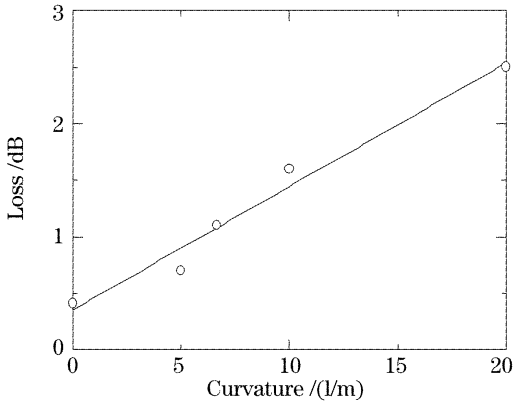


图 4　测得的对于 Er∶YAG 激光的空芯光纤弯曲损耗

Fig. 4　Measured bending loss of hollow fiber for Er∶YAG laser light

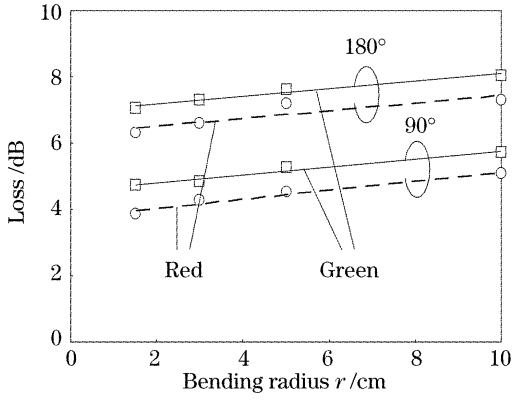


图 5　测得的对于红色和绿色导航光的空芯光纤弯曲损耗

Fig. 5　Measured bending loss of hollow fiber for red and green pilot beams

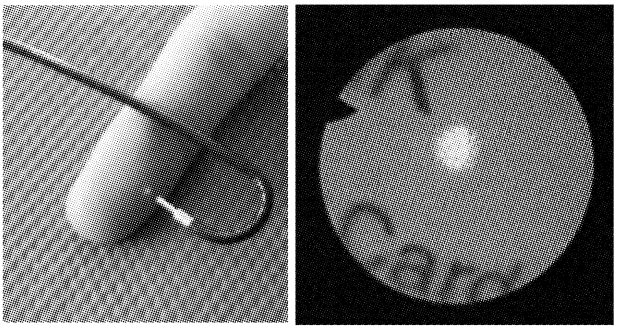
高柔韧性、安全性等突出优点。但聚碳酸酯毛细管的管壁薄，入射光耦合校准有偏差时端面容易被激光烧坏。实验中，脉冲频率 10 Hz 在 100 mJ/pulse 即出现端面热损坏现象。采用了金属入射端面保护，防止激光直接照射在断面上。由此，脉冲频率 10 Hz 在 350 mJ/pulse 进行了 5 min 传输实验没有发现任何劣化及损伤迹象。

3 内窥镜中的红外空芯光纤传输特性

测试使用的内窥镜为 UP2-2565 型软性医疗用内窥镜，全长 940 mm，先端有效长度 650 mm。有效部分的外径为 2.5～2.7 mm。工作通道的内径为 1.2 mm。内窥镜采用石英光纤束传输图像和照明光。通过观察窗可以看到内窥镜先端到达位置的情况。通过操作手柄可以使先端达到得最小弯曲为半径 0.8 cm，角度 180°。

长度 1 m，内径 700 μm 的空芯光纤从内窥镜的工作通道装入，从通道的输出口伸出 1 cm。进行了 Er∶YAG 激光和绿色导航光的传输实验。输出端为直线和输出端 135°弯曲(半径 0.9 cm)的状态下，其损耗值分别为 1.4 dB 和 1.7 dB。损耗较图 4 中的结果有较大增加。这是因为装入内窥镜的光纤在输入端有大约 30°的弯曲。空芯光纤在输入端的弯曲会激励高次模式，而这些高次模式被很快衰减。因此损耗大大高于图 4 中直线状态的损耗。输出端 135°(半径 0.9 cm)的弯曲所造成的附加损耗仅为 0.3 dB，这说明先端的微小弯曲对损耗的影响已大大减弱。因为高次模式的能量在光纤的前端已经被衰减，输出端的低次模式对弯曲的敏感度较低。

波长为 0.53 μm 的绿色导航光在输出端为直线和输出端 180°弯曲(半径 0.9 cm)的状态下，其损耗值分别为 11 dB 和 14 dB。同样道理其损耗值也远远大于图 5 中的测试结果。由于绿色激光的功能是导航，14 dB 的损耗是可以接受的。图 6(a)所示是输出端 180°弯曲(半径 0.9 cm)的状态下的绿色激光输出的照片。绿色激光光源为波长 0.53 μm、输出功率 3 mW 的半导体激光器。在明亮的室内灯光下，绿色指示点清晰可见足以满足为红外光导航的需要。图 6(b)所示是从内窥镜的视窗中观察的图像。书中的英文字母和绿色斑点也清晰可见。



(a) (b)

图 6 已将空芯光纤安装在工作通道内的内窥镜

Fig. 6 Endoscope with hollow fiber installed in working channel

4 结 论

理论计算证实，空芯光纤具有同时低损耗传输红外和可见光的可能性。在几乎不影响红外激光的损耗特性的条件下，可以微调节介质膜厚度选择可见光的波长。利用聚碳酸酯毛细管作为的基管，研制了具有优越柔韧性能和损耗特性的红外空芯光纤。根据实验结果优化了介质膜的镀膜参量，为研制高性能多功能红外空芯光纤提供了依据。实现了 Er∶YAG 和可见导航光的低损耗传输，其损耗分别为 0.4 dB 和 3 dB。加有输入端保护装置的光纤可以传输脉冲频率 10 Hz，350 mJ/pulse 的 Er∶YAG 激光脉冲。根据医疗现场的实际应用情况，该空芯光纤组装在医疗用内窥镜中进行了激光传输实验。因为光纤在工作通道中的弯曲和应力等原因，红外 Er∶YAG 激光和可见导航光的传输损耗略有增加，分别为 1.4 dB 和 11 dB。实验表明该光纤的特性可以满足医疗等领域的应用，有广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 Joel M. H. Teichman, Kin F. Chan, Patricia P. Cecconi *et al.*. Erbium∶YAG versus holmium∶YAG lithotripsy[J]. *J. Urol.*, 2001, **165**: 876～879

2 Roshan George, James A. Harrington. Cu/CuI-coated hollow glass waveguides for delivery of infrared radiation[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(5): 055004-1～055004-4

3 Yi-wei Shi, Kentaro Ito, Lin Ma *et al.*. Fabrication of a polymer-coated silver hollow optical fiber with high performance[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(26): 6736～6740

4 Joshua Raif, Michael Vardi, Oded Nahlieli *et al.*. Er∶YAG laser endoscopic fiber delivery system for lithotripsy of salivary stones [J]. *Laser in Surgery and Medicine*, 2006, **38**(6): 580～587

5 Du Jiuhui, Hou Lantian, Li Shaosheng *et al.*. Theories and applications on output energy distribution of hollow fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1261～1265 (in Chinese)
堵久辉，侯蓝田，李绍胜 等. 空芯光纤输出能量分布及其应用的研究[J]. 中国激光，2004，**31**(10)：1261～1265

6 Yang Yi, Zhou Guiyao, Hou Zhiyun *et al.*. Study on transmitting character in GeO_2 dielectric hollow waveguides[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 301～304 (in Chinese)
杨 义，周桂耀，侯峙云 等. GeO_2 介质膜空芯传能光纤的传输特性分析[J]. 中国激光，2004，**31**(3)：301～304

7 Masayuki Nakazawa, Yuwei Shi, Yuji Matsuura *et al.*. Hollow

polycarbonate fiber for Er∶YAG laser light delivery[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1373～1375

8 Mitsunobu Miyagi, Shojiro Kawakami. Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **LT-2**(2): 116～126

9 Lou Jingyi, Tong Limin. Study on hollow waveguides of polystyrene coated silver-glass for transmission of infrared laser energy[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2001, **20**(3): 229～232 (in Chinese)

楼静漪，童利民. 红外激光传输用聚苯乙烯-银-玻璃基体空心波导研究[J]. 红外与毫米波学报，2001，**20**(3)：229～232

10 You Wang, Akihito Hongo, Yuji Kato *et al.*. Thickness and uniformity of fluorocarbon polymer film dynamically coated inside silver hollow glass waveguides[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2886～2892

11 Yiwei Shi, Yukio Abe, Yuji Matsuura *et al.*. Low loss smart hollow waveguides with new polymer coating material[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1999, **31**: 135～140

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(http://www.opticsjournal.net)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自 2004 年 5 月开通以来，得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平，中国光学期刊网从 2006 年起在信息服务上实行会员制度，凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员，中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括：

1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现，并链接到企业自己的网址。

2) 会员企业可获赠光学类期刊一份，全年 12 册，在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。

3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10 条，每篇不过 2000 字。

4) 如在中国光学期刊网发布广告，可享受广告报价的 80%优惠。

5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。

6) 可免费阅读本网站期刊全文 300 篇次。

二、会员义务：

1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。

2) 每年交纳会员费 2800 元，会员资格从交费之日起计算，一年有效。

3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。

4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。

5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤：

1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户，也可以直接填写广告投放申请表单，说明您的意向。

2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。

3) 银行汇款 2800 元至下列帐户：

开户行：工商银行上海嘉定支行营业部　户　名：中国科学院上海光学精密机械研究所

帐　号：1001700809026400195

4) 联系人：郑继承；电话：021-69918253；Email：expert@mail.siom.ac.cn