

文章编号: 0253-2239(2006)03-0326-5

# 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化\*

徐艳平<sup>1</sup> 顾铮<sup>1\*\*</sup> 陈家璧<sup>1</sup> 高侃<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学光电功能薄膜实验室, 上海 200093  
<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要:** 基于三包层长周期光纤光栅模型,研究了包层表面涂覆一层溶胶-凝胶气敏薄膜的长周期光纤光栅化学传感器的灵敏度  $S_n$  与薄膜光学参量(折射率  $n_3$  和厚度  $h_3$ )和光纤光栅结构参量(光栅周期、折变量和光栅长度)之间的关系。采用最优化数值方法,找到了获得高灵敏度所需的最佳膜层光学参量和光栅结构参量。理论计算表明,该类型传感器对膜层折射率的测量分辨率高达  $10^{-8}$ 。实验上制作了对乙醇气体敏感的传感器,并证实了传感器结构优化的必要性。

**关键词:** 导波与光纤光学;长周期光纤光栅;溶胶-凝胶;气敏传感器;结构优化

中图分类号: TN253; TP212.14 文献标识码: A

## Structure Optimization of Long-Period Fiber Grating Gas-Sensing Film Sensors

Xu Yanping<sup>1</sup> Gu Zhengtian<sup>1</sup> Chen Jiabi<sup>1</sup> Gao Kan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Lab. of Photo-Electric Functional Films, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093  
<sup>2</sup> Lab. of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** Based on a triple-clad numerical model, a long-period fiber grating chemical sensor coated with the sol-gel gas-sensing films on the cladding of the fiber grating region is studied. The relation between the sensitivity  $S_n$  and the thin film optical parameters (thickness  $h_3$  and refractive index  $n_3$ ), and the fiber grating parameters (the grating period, the core index modulation and the grating length) is analyzed. By using optimization method, the optimal optical parameters of thin film and fiber grating parameters are obtained to make the sensor highly sensitive. Numerical simulation shows that the sensitivity of this scheme to refractive index of the films is  $10^{-8}$ . In the end a long-period fiber grating sensor sensitive to  $C_2H_5OH$  is fabricated, which proves the necessity of the structure optimization of the sensor.

**Key words:** guided-wave and fiber optics; long-period fiber grating; sol-gel; gas-sensing sensor; structure optimization

## 1 引 言

长周期光纤光栅(Long-period fiber grating, LPFG)由于具有很高的折射率敏感性<sup>[1]</sup>,已被应用于化学溶液浓度测量<sup>[2~5]</sup>。应用时长周期光纤光栅大都直接沉浸在气体或液体等外部介质中,只有外部环境折射率小于光纤包层的折射率时才有较高的灵敏

度,这就在很大程度上限制了其在化学检测方面的应用。Nicholas D. Rees 等<sup>[6]</sup>通过在光纤光栅包层上镀一层折射率随外界环境变化而变化的敏感薄膜,研究了薄膜厚度大小对长周期光纤光栅透射谱的影响。这种结构消除了要求待检测化学物质折射率小于包层折射率的限制,为发展专用化学长周期光纤光栅传

\* 上海市教委“曙光计划”(02SG32)和上海市自然科学基金(03ZR14071)资助课题。

作者简介:徐艳平(1977~),男,山东烟台人,上海理工大学光学与电子信息工程学院博士研究生,主要从事光纤光栅传感和通信、光电精密测量与工程的研究。E-mail: nowday@163.com

\*\* 通信联系人。E-mail: zhengtiangu@163.com

收稿日期: 2005-02-21; 收到修改稿日期: 2005-05-10

感器提供了可能。溶胶-凝胶薄膜由于其孔隙率高,相应的表面积也很大,对气体的敏感度和响应度高,特别适合于作气敏材料。当镀有半导体金属氧化物薄膜的长周期光纤光栅传感器暴露在外部气体中时,半导体表面能态将发生变化,引起膜层折射率的微小改变,进而引起透射峰的明显偏移。

本文建立了三包层长周期光纤光栅模型,通过计算确定了具有最佳灵敏度的长周期光纤光栅传感器薄膜光学参量(膜厚和折射率)及光栅结构参量,这对设计高灵敏度光纤光栅气敏传感器具有直观的指导意义。实验上选择半导体溶胶-凝胶(sol-gel)气敏薄膜作为传感层,通过光纤光栅包层上镀一层半导体  $\text{SnO}_2$  气敏薄膜,观察了镀有  $\text{SnO}_2$  薄膜的长

周期光纤光栅传感器对乙醇( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )和甲烷( $\text{CH}_4$ )气体的响应情况。

## 2 三包层长周期光纤光栅理论模型

图 1(a)和图 1(b)分别是三包层长周期光纤光栅薄膜传感器的结构和折射率分布示意图。已知纤芯半径为  $a_1$ ,包层半径为  $a_2$ ,薄膜层半径  $a_3$ 。薄膜厚度  $h_3 = a_3 - a_2$ 。芯层折射率  $n_1$ ,光栅区域的平均折射率改变量为  $\sigma$ ,数量级为  $10^{-4}$ 。光栅长度  $L$ ,一般为几个厘米。包层折射率  $n_2$ ,敏感薄膜折射率  $n_3$ ,周围环境(气体)折射率  $n_4$ 。

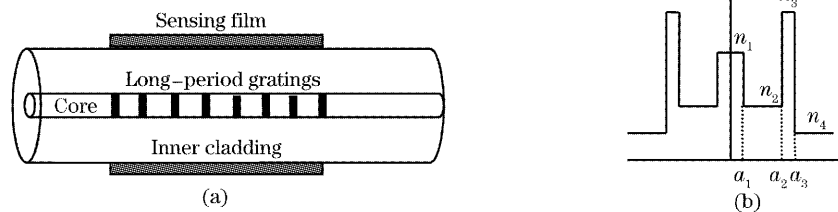


图 1 三包层长周期光纤光栅气敏薄膜传感器模型。(a)结构模型,(b)折射率分布模型

Fig. 1 Triple-clad long-period fiber grating gas-sensitive film sensor model. (a) Structural diagram, (b) refractive index profile

若以光栅中点为  $z$  轴原点,长周期光纤光栅的边界条件如下: $A^\infty(z = -L/2) = 1, A_v^{\text{cl}}(z = -L/2) = 0$ ,其中  $A^\infty(z), A_v^{\text{cl}}(z)$  是纤芯导模和包层模的振幅,长周期光纤光栅的透射率定义为<sup>[7]</sup>

$$T = A^\infty(L/2)/A^\infty(-L/2). \quad (1)$$

当敏感膜层的性能随外界环境发生微小变化时,会引起透射谱曲线的变化,为了表征气体传感器灵敏度的高低,定义透射率  $T$  的梯度与传感膜层折射率  $n_3$  梯度之比的绝对值  $S_n$ :

$$S_n = \left| \frac{\partial T}{\partial n_3} \frac{n_3}{T} \right|, \quad (2)$$

为传感器对膜层折射率的灵敏度。由于包层模式传播常量与薄膜的厚度、折射率有关,透射谱中的场分量与传播常量有关,因此  $S_n$  是膜层光学参量的多元函数,与薄膜折射率、薄膜厚度、入射光波波长、光栅周期和光栅长度有关。

依据耦合模理论<sup>[7~9]</sup>,计算  $S_n$  随着薄膜参量变化的函数关系,进一步采用最优化数值方法,通过分析透射谱与薄膜厚度和折射率的关系,寻找传感器膜层的最佳光学参量。根据所采用的膜层参量,选取一定的波长,使其工作在长周期光纤光栅的某次包层模式耦合波长附近,考察传感器与被测物质作用前后透射

谱的变化情况,从而达到检测物质的目的。

## 3 数值模拟

本文采用的光纤参量为: $a_1 = 2.625 \mu\text{m}, a_2 = 62.4 \mu\text{m}; n_1 = 1.458, n_2 = 1.45, n_4 = 1$ 。

### 3.1 薄膜参量的优化设计

图 2 给出了不同的  $n_3, h_3$  在给定光栅结构参量及入射波长 1390~1530 nm 范围内对应  $S_n$  最大值

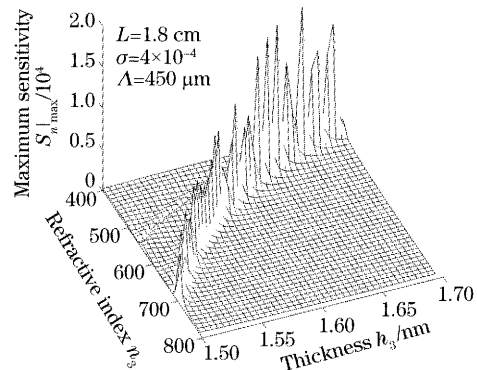


图 2 膜厚 400~800 nm 折射率  $n_3 = 1.5 \sim 1.7$  范围内最大灵敏度  $S_{n|\max}$

Fig. 2 Dependence of  $S_{n|\max}$  on  $n_3$  for  $h_3$  ranging from 400~800 nm ( $n_3 = 1.5 \sim 1.7$ )

$S_n|_{\max}$ 。薄膜厚度  $h_3$  在 400~800 nm, 薄膜折射率  $n_3$  在 1.5~1.7 之间。可以看出对于不同的  $(n_3, h_3)$  组合, 所能达到的最大灵敏度  $S_n|_{\max}$  各不相同。 $S_n|_{\max}$  最大值的数量级为  $10^4$ , 图 3 为  $S_n|_{\max}$  为  $10^4$  的等高线, 从中可以选择设计高灵敏度长周期光纤光栅气敏薄膜传感器所需材料的折射率和膜厚, 进一步可确定入射波长大小。

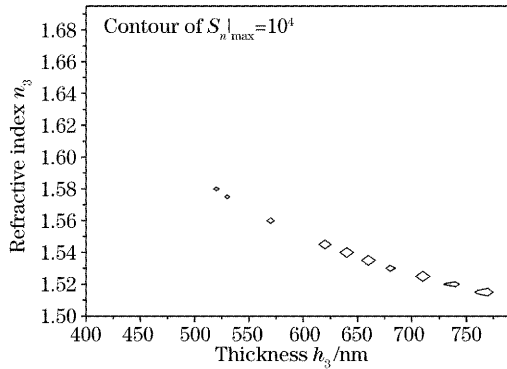


图 3  $S_n|_{\max}=10^4$  等高线图

Fig. 3 The contour line of  $S_n|_{\max}=10^4$

表 1 给出了三种典型的薄膜光学参量设计值及相应的灵敏度和分辨率, 其中  $\sigma_n$  表示传感器对膜层折射率的最小分辨率,  $\sigma_n = S_n^{-1} n dT/T$ 。对于常用的光谱仪, 透射谱的  $T$  的变化率  $dT/T$  的测量精度可取  $10^{-3}$ 。根据表 1 的结果, 选择恰当的薄膜光学参量和入射波长, 该传感器对折射率的最小分辨率可达  $10^{-8}$ 。

表 1 几个典型的光学参量值及其灵敏度和分辨率

Table 1 Typical optical parameters and relevant sensitivity and resolution

Refractive index $n_3$	Thickness $h_3$ /nm	Wavelength /nm	Sensitivity $S_n$	Resolution $\sigma_n$
1.52	740	1477.4	$1.25 \times 10^4$	$1.21 \times 10^{-7}$
1.54	640	1476.7	$1.77 \times 10^4$	$8.70 \times 10^{-8}$
1.56	570	1476.0	$1.27 \times 10^4$	$1.23 \times 10^{-7}$

### 3.2 光纤光栅结构参量的优化设计

图 4、图 5 和图 6 分别给出了不同的膜厚和光栅结构参量及入射波长 1390~1530 nm 范围内对应  $S_n$  的最大值  $S_n|_{\max}$ 。可以看出通过调整光栅结构参量也可以获得高灵敏度。

调整薄膜参量和光栅结构参量都可以获得高灵敏度。但在实际工作中, 最好选取实际可行的参量, 即光栅长度不能太长(强度考虑), 薄膜材料取决于对检测气体灵敏的敏感材料, 其折射率在一定范围内可调。

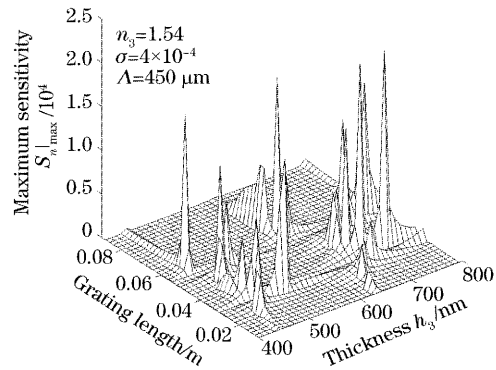


图 4 膜厚 400~800 nm、光栅长度  $L=0.01\sim 0.09$  m 范围内最大灵敏度  $S_n|_{\max}$

Fig. 4 Dependence of  $S_n|_{\max}$  on grating length  $L$  for  $h_3$  ranging from 400~800 nm ( $L=0.01\sim 0.09$  m)

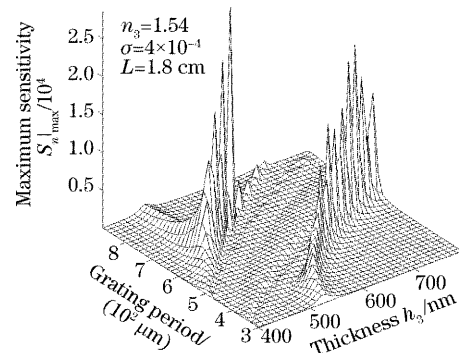


图 5 膜厚 400~800 nm、光栅周期 300~900  $\mu\text{m}$  范围内最大灵敏度  $S_n|_{\max}$

Fig. 5 Dependence of  $S_n|_{\max}$  on grating period for  $h_3$  ranging from 400~800 nm ( $\Lambda=300\sim 900 \mu\text{m}$ )

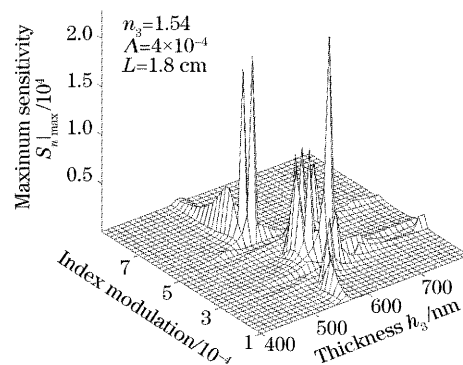


图 6 膜厚 400~800 nm、折变量 0.0001~0.0009 范围内最大灵敏度  $S_n|_{\max}$

Fig. 6 Dependence of  $S_n|_{\max}$  on index modulation for  $h_3$  ranging from 400~800 nm ( $\sigma=0.0001\sim 0.0009$ )

## 4 实验研究

### 4.1 实验装置

长周期光纤光栅气敏薄膜传感器的系统配置如

图 7 所示, 宽带 LED 作为光源, 经过耦合器耦合输入光纤, 光纤中光栅部分放在气室中。气室采用温度控制仪使温度保持恒温(150 °C), 以消除长周期光纤光栅对温度的敏感性。用光谱分析仪分析长周期光纤光栅的透射谱特性, 结果在计算机上实时显示。

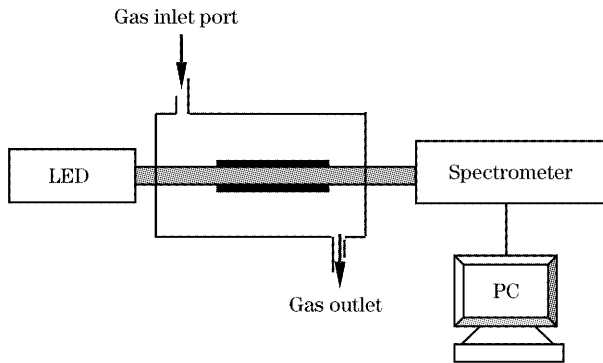


图 7 长周期光纤光栅薄膜气敏传感器实验装置图

Fig. 7 LPFG gas-sensitive film sensor experimental set-up

#### 4.2 实验样品制备

实验中采用的光纤为 Corning 的普通通信光纤 SMF-28, 制作光栅前先将它们放入  $1.52 \times 10^7$  Pa 的高纯氢气中载氢一周以提高其光敏性。实验用的激光器为波长 193 nm 的准分子激光器, 单个脉冲的能量为  $170 \text{ mJ/cm}^2$ , 重复频率为 5 Hz。采用周期为  $450 \mu\text{m}$  的铜制振幅掩模板制成的长度为 4 cm 的光纤光栅, 在 150 °C 的高温下退火 24 h 以提高它们的温度稳定性。

采用浸渍提拉法, 在光栅包层表面涂覆一层溶胶-凝胶  $\text{SnO}_2$  薄膜, 为了考察薄膜光学参量(折射率、膜厚)对光纤光栅传感器灵敏度的影响, 选择提拉速率分别为 3 cm/min、9 cm/min、15 cm/min(以下称样品 1、2、3), 并经 500 °C 高温热处理, 得到不同光学参量的  $\text{SnO}_2$  薄膜。三个样品薄膜的折射率和厚度依次约为 1.840、1.825、1.800 及 115 nm、135 nm、155 nm。

#### 4.3 气敏初步实验及分析

将光纤光栅样品 1、2、3 分别置于乙醇蒸气和甲烷气体中, 观察到谐振峰的幅度均有下降, 且乙醇蒸气较明显, 其中样品 2 的谐振峰漂移尤为明显。图 8 给出了实验中记录的样品 2 与乙醇蒸气作用前后的透射谱图。观测到乙醇蒸气中其透射谱谐振峰往短波漂了 2 nm 左右, 其峰值附近的透射率变化约 20%。实验中所观测的峰为第 4 个峰, 谐振波长约 1550 nm, 光谱仪的波长最小精度为 0.07 nm。

实验中薄膜厚度、折射率和光栅结构参量均未

处在结构优化的最佳区域, 传感器光学灵敏度尚未达到最佳值。进一步对样品 1、2、3 的折射率灵敏度理论计算, 其值约为 18、780 和 9.4, 可见, 样品 2 的光学参量较合适, 对折射率的灵敏度也较高, 因而实验现象较为明显。因此, 必须依据理论模型获得的薄膜光学参量最佳值, 控制溶胶-凝胶工艺条件, 设计制备与高灵敏长周期光纤光栅气敏传感器相适应的薄膜, 适应不同的需要。

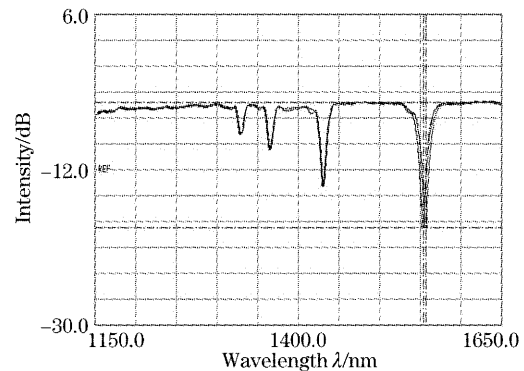


图 8 样品 2 与乙醇蒸气作用前后的透射谱图

Fig. 8 Transmission spectrum of sample 2 before and after acting on alcohol

## 5 结 论

三包层长周期光纤光栅气体薄膜传感器的灵敏度与膜层光学参量和光纤光栅结构参量密切相关。一方面, 不同的薄膜光学参量(折射率和厚度)可以影响模式的耦合强度及谐振峰的位置; 另一方面, 光纤光栅的结构参量(光栅长度、光栅周期及折变量等)对包层模透射谱的透射谱形状和谐振峰的高度有较大影响。计算结果表明, 该类型传感器对膜层折射率的测量分辨率高达  $10^{-8}$ 。这为建立实际的传感器提供了直观的依据。

采用溶胶-凝胶法在光纤光栅包层表面镀上一层二氧化硅薄膜, 并进行了初步的气敏实验, 观察了其对实验气体的响应, 发现具有合适薄膜光学参量的光纤光栅对乙醇有较高的响应, 实验现象与理论分析基本一致。这种传感器集中了薄膜传感器和光纤传感器的优点, 有望在光化学传感器中得到广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 Vikram Bhatia, Ashish M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(9): 692~694
- 2 Xuewen Shu, Dexiu Huang. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks

- in a 100  $\mu\text{m}$  period fibre grating[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**(1~3): 65~69
- 3 T. Allsop, L. Zhang, I. Bennion. Detection of organic aromatic compounds by a long period fibre grating optical sensor with optimised sensitivity[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**(3~6): 181~190
- 4 R. Falciai, A. G. Mignani, A. Vannini. Long period gratings as solution concentration sensors[J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, **74**(1~3): 74~77
- 5 Hinchong Chong, Ping Shum, H. Haryono *et al.*. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1~6): 65~69
- 6 Nicholas D R, Stephen W. Sames, Ralph P. Tatam *et al.*. Optical fiber long-period gratings with Langmuir-Blodgett thin-film overlays[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688
- 7 Turan Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 8 He Wanxun, Shi Wenkang, Ye Ailun *et al.*. Modes and couplings of long period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 302~306 (in Chinese)  
何万讯, 施文康, 叶爱伦 等. 长周期光纤光栅模式与耦合的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 302~306
- 9 Charles Tsao. *Optical Fiber Waveguide Analysis* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1992



## 首届 LASER. World of Photonics China 展会将于近期在上海举行

两年一届在德国慕尼黑举办的 LASER. World of Photonics 是国际激光、光电子领域的顶级盛会,覆盖了从激光、光学到光电子的整条产业链。于 2005 年 6 月结束的上届展会汇集了全球 1000 多家行业领先企业,在为期四天的展会上共有近 3 万名来自全球各地的专业观众。

借助母展国际化的特点和国际影响,首届 LASER. World of Photonics China (LASER China) 将于 2006 年 3 月 21~23 日在上海隆重开幕。目前已有国内外 100 多家展商报名参展,其 70% 参展商是活跃在全球市场的国际性领先企业。展会主要分为激光元件、激光设备两大展区,展会期间还将举行多场高质量的激光技术国际研讨会。

LASER China 还将与第 5 届慕尼黑上海电子展同期同地举办,与电子工业这一激光产业的主要应用领域充分互动,共同打造全球化交流平台和国际性顶级专业盛会。

### 一、首届展会展商规模庞大

目前,中国激光光电子市场正以年平均 30% 的速度增长,世界各国激光光电子制造商日益认识到中国市场的重要性,德国 Spectaris 协会有 41% 的企业已与中国建立商业往来。中国市场的吸引力加上 LASER World of Photonics 的号召力,使得众多国际企业对 LASER China 表现出浓厚兴趣,决定参加首届展会。

TRUMPF, Rofin, Coherent, GSI, Jenoptik, Melles Griot, PRC, nLight, Miyachi, Spectra Physics, JDS Uniphase, Laservall, Bystronic 等国际领先企业均预定了大规模的展台,将在会期作集中展示。TRUMPF 更是在显著位置预订了 150 平方米的大型展台,展出其具有世界领先水平的激光切焊等方面的精密设备。同时,国内领先企业也毫不示弱,团结普瑞玛、大族、楚天、华工、国科、长春新产业、华北奥依特、泰德激光、海特等国内知名企业也早早预订了展位,与国际企业一争高下。这一切都预示着本届 LASER China 将一举奠定国内激光、光电子行业的顶级展会。

### 二、同期举行各种高质量的活动

展会期间还将推出各项高水准的同期活动,其中包括:“中德激光技术——现状、趋势与发展研讨会”,“激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会”,“LASER VISION”展团,以及 Intec.net 合作论坛。

“中德激光技术——现状、趋势与发展研讨会”由慕尼黑国际博览集团和汉诺威激光中心(Laser Zentrum Hannover)共同组织。该会议为期两天,将围绕激光材料加工技术现状、发展及未来趋势进行专题研讨。演讲公司包括:Coherent, Lambda Physik, Spectra Physics 以及中国科学院上海光学精密机械研究所等。中国作为世界第二大机械工具消费市场,近来又成为世界最大的机械工具进口国,激光粗加工与精细加工领域的课题将是会议热点。

“激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会”激光器前沿技术最新发展及应用国际研讨会将围绕固态激光器、CO<sub>2</sub> 激光器、纳米激光器、超短/超快/超强激光器等新型激光器前沿技术与最新应用展开讨论。到会作技术报告的科学家来自中国科学院、北京大学、天津大学、华中科技大学、华南师范大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等科研院所。

此次研讨会得到美国相干(Coherent)公司的大力支持,将有多名来自该公司的科技专家到会发言。

“LASER VISION”展团由慕尼黑国际博览集团和 TU 柏林服务公司主办。展团旨在为德国以及其他欧洲国家的高等院校、研究机构和技术革新企业提供机会,向参展的中国和国外的专家们展示各自的研究成果和产品研发成果。

intec.net 合作论坛专门为那些正在寻求机会进入中国的企业,尤其是中型企业而设立,在特定范围内寻求合适的国际合作伙伴,安排洽谈会、组织参观相关公司,以方便有合作兴趣的国际企业同潜在的中国合作者见面洽谈。

详情您可以登录展会官方网站: [www.laserchina.net](http://www.laserchina.net), 或与我们联系:

慕尼黑展览(上海)有限公司	上海市浦东新区银霄路 393 号	百安居浦东商务大厦 502 室
邮 编: 201204	电 话: +86 21 50450808	传 真: +86 21 50458100
E-mail: <a href="mailto:laser@mmi-shanghai.com">laser@mmi-shanghai.com</a>		