

文章编号: 0258-7025(2003)05-0457-06

线源金属原子蒸气发生装置的研制

包成玉, 杜英歌, 迟涛, 王雅睿, 张黎源, 王立军, 王德武

(清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要 介绍了一套线源金属原子蒸气发生装置。该装置由以下几部分组成: 不锈钢真空蒸发腔体; 真空获得系统; 电子枪; 坩埚; 能产生均匀磁场的磁极及线圈; 推拉式内置工作平台; 循环水冷却系统; 电源、测量仪器及控制电路。经安装、调试和试运行试验, 性能良好, 已达到原设计指标。真空度达到 3×10^{-3} Pa, 对钷金属材料, 能产生熔池的表面面积为 $22 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。利用此装置可开展电子枪蒸发、离子引出等多项实验研究。

关键词 同位素分离技术; 原子蒸气激光同位素分离; 电子枪; 金属蒸气; 均匀磁场; 真空系统

中图分类号 TL 25⁺ 3; TL 503. 3; TG 174. 444; TM 153; TB 753 文献标识码 A

Manufacture and Research of the Linear-source Metal Atom Evaporation Device

BAO Cheng-yu, DU Ying-ge, CHI Tao,

WANG Ya-rui, ZHANG Li-yuan, WANG Li-jun, WANG De-wu

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract This paper reported a set of metal atom evaporation device of linear source. The device is composed of the following parts: stainless steel vacuum evaporation cavity, vacuum attaining system, electron gun, crucible, uniform magnetic field, push-and-pull inner worktable, water cooling system, power supply, measure instrument and control circuit. The device has achieved its primary design targets by several test runs after installing and debugging. The vacuum degree is above 3×10^{-3} Pa. The superficial melt area reaches to $22 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ to gadolinium metallic material. Many experiments such as the evaporation by the electron gun, ions extraction can be carried out with this device.

Key words isotope separation technique; atomic vapor laser isotope separation (AVLIS); electron gun; metal vapor; uniform magnetic field; vacuum system

1 引言

原子法激光分离同位素 (Atomic Vapor Laser Isotope Separation—AVLIS) 的基本原理是选择性激发^[1], 即基于原子光谱的同位素位移效应, 用强的多种单色可调谐激光辐射原子系统, 使其中一种同位素逐级选择性激发直至电离, 而另一种同位素仍保持在未激发态, 再利用电磁场将被电离的原子引出。

AVLIS 技术具有分离系数高、投资小、耗电少、成本低和生产规模灵活等特点, 被认为是继扩散法、

离心法之后最有希望发展成为一种新的工业生产浓缩轴的方法。在此技术领域, 金属铀的蒸发是首要环节。

AVLIS 法的基本步骤如下: 在真空容器中, 用高能电子枪轰击金属铀, 使其在高温下真空蒸发, 形成原子蒸气束; 用多束激光横向照射铀原子蒸气进行选择性激发和电离; 最后加一电磁场, 使²³⁵U⁺ 发生偏转, 与处于中性基态的²³⁸U 原子蒸气分离开来, 分别由精料收集板和尾料收集板收集。

AVLIS 法的分离系统可以分为激光器系统和分

收稿日期: 2002-02-05; 收到修改稿日期: 2002-04-30

作者简介: 包成玉(1946—), 男, 清华大学工程物理系副教授, 硕士, 主要从事激光应用的教学和科研工作。E-mail: baocy@mail.tsinghua.edu.cn

分离器系统二大部分。分离器系统由真空室、蒸发器、分离室、收集板组成。本文的工作属于分离器的基本部分。

2 基本结构

装置外形如图 1。图中左边为电子枪电源和控制系统,右边上方为主腔体。电子枪、坩埚、均匀磁场、推拉式内置工作平台和部分循环水管道均在主腔体内。

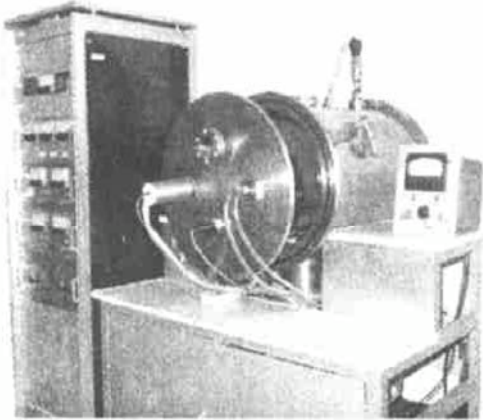


图 1 线源金属原子发生装置外形图

Fig. 1 Appearance of the linear source metal atom evaporation device

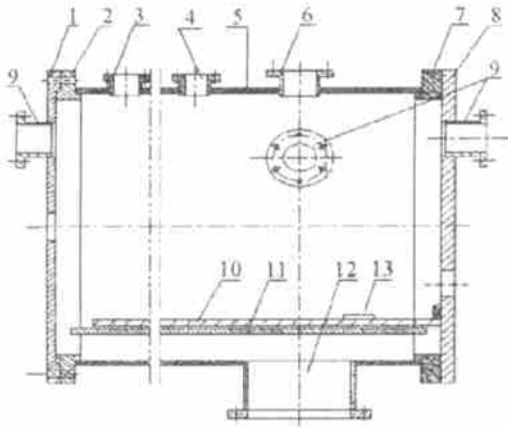


图 2 主腔体结构图

1: 静端面法兰; 2: 静端面法兰底盘; 3, 4, 6, 9, 12: 法兰; 5: 筒体; 7: 端面动法兰底盘; 8: 动端面法兰; 10: 托架; 11: 滑动导板; 13: 卡头

Fig. 2 Main chamber structure diagram

1: still flange plate of the end face; 2: still flange chassis of the end face; 3, 4, 6, 9, 12: flange plate; 5: chamber body; 7: movable flange chassis of the end face; 8: movable flange plate of the end face; 10: carrier; 11: slide guide board; 13: choppers

2.1 主腔体结构

真空主腔体结构如图 2 所示。很多实验工作主要在主腔体内进行。右端法兰与滑动导板固定在一起可以整体拖动。

电子枪、坩埚、磁场线圈、磁靴、冷却水管及以后实验所用的零件、部件,均可将滑动导板拉出后在腔外安装在导板上,再整体推入腔体中。这种结构设计为安装、拆卸,更换零件,以及改变实验条件,进行深入的实验研究带来了方便。

激光将从主腔体上的窗口进入。光信号也可经窗口测量,电源和电信号通过专用窗口接线。动端面法兰上的窗口连接腔内和腔外冷却水管道。

2.2 电子枪和坩埚

电子枪一般分为热发射和场致发射两种。我们选用热发射型。电子枪一般采用三电极结构:即发射电子的阴极,对电子束起聚焦作用的聚束极和引出电子的阳极。由低电离材料制成的阴极放在聚束极的下边,两电极电位相同。阳极的底部有一引出电子的中心孔。阳极底部的内表面与聚束极的表面构成电子光学系统,电力线的分布形状对电子束起聚焦调节作用。当电子枪的阴极被加热的时候,就会产生大量的电子。电子从阴极表面发射出来。为获得足够的电子流,阴极需要有一定的温度和发射面积。阴极发射出的电子流,离开阴极以后,由于受到聚束极的作用,会聚成束进行第一次聚焦,并在阳极加速电压的作用下飞向阳极。通过阳极孔的电子束流,在继续行进中,因为受到空间电荷及真空室压力等的影响,又必然会发散。为了防止蒸发过程中金属蒸气进入阴极-阳极之间造成击穿,并使电子束进一步汇聚成极小的束斑,通常采用磁场再聚焦。偏转方向和偏转量可以通过调节磁场线圈的电流大小来改变。

为了保证电子枪的电子光学系统有良好的聚焦作用,电极形状及位置和阳极孔径都要经过计算机优化计算^[2,3]。主要参数指标如下:工作电压:6 kV/10 kV;阴极钨丝发射长度:30 mm;钨丝直径:1.5 mm;均匀磁场大小: $6 \sim 9 \times 10^{-3}$ T 可调。

电子枪结构如图 3 所示。实验时选用的参数如下:阴极宽度 $d_1 = 1.5$ mm;聚束极孔径 $d_2 = 2.1$ mm;阳极孔径 $d_3 = 6$ mm;聚束极厚度 $l_1 = 0.5$ mm;聚阳极距 $l_2 = 6$ mm;阳极厚度 $l_3 = 2$ mm;阴极深度 $l_4 = 0.8$ mm。

2.2.1 电子枪阳极

阳极采用厚 2 mm 的不锈钢板加工而成,在电子枪工作时,钨丝两端加负高压,而阳极处于零电位。阳极孔的宽度为 6 mm。阳极结构如图 4 所示。

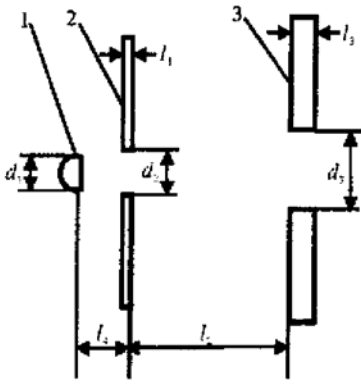


图 3 电子枪结构参数

1: 钨丝; 2: 聚束极; 3: 阳极板; d_1 : 阴极宽度; d_2 : 聚束极孔径; d_3 : 阳极孔径; l_1 : 聚束极厚度; l_2 : 聚阳距; l_3 : 阳极厚度; l_4 : 阴极深度

Fig. 3 Structural parameters of electron gun

1: tungstic filament; 2: assemble beam pole; 3: anode plate; d_1 : width of cathode; d_2 : bore diameter of assemble beam pole; d_3 : bore diameter of anode; l_1 : thickness of assemble beam pole; l_2 : distance between assemble beam pole and anode; l_3 : anode thickness; l_4 : cathode depth

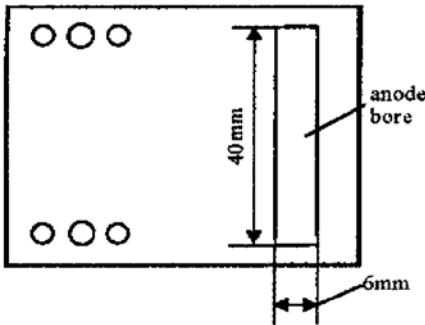


图 4 阳极板结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of anode plate

2. 2. 2 电子枪阴极

阴极采用 $\phi 1.5$ mm, 长 73 mm 的钨丝, 有效发射电子长度为 30 mm。为了保证发射长度, 将中间 30 mm 处磨平以增大其电阻。钨丝的总电阻 R 为

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \left[\frac{L_1}{S_1} + \frac{L - L_1}{S_0} \right]$$

式中 ρ 为电阻率, L_1 为磨平处长度, S_1 为加工处截面积, L 为钨丝总长, S_0 为钨丝未加工截面面积。

当 $T = 20^\circ\text{C}$ 时, 电阻率 $\rho = 5.51 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 电阻 $R = 4.22 \times 10^{-3} \Omega$ 。发射电子时 $T = 2727^\circ\text{C}$, 电阻率 $\rho = 98.9 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 电阻 $R = 7.57 \times 10^{-3} \Omega$ 。

通常钨丝在电流达到 50A 的条件下才会产生热发射。电控柜提供给灯丝两端的电压为 6 V。因此可估算出该阴极在发射电子的温度下电压 6 V 时能

够通过的最大电流为 79 A, 因此能够满足正常工作条件。

两端固定的阴极由于热膨胀的影响易发生弯曲, 从而导致电子束发射的非线性, 使得电子束在磁场中的偏转聚焦不良, 降低功率密度。估算钨丝受热膨胀约 1 mm, 且其形变的影响不可忽略。为保持钨丝的线性, 实验中采用一端固定, 一段自由膨胀的结构。

2. 2. 3 聚束极

聚束极宽度和高度对电子束聚焦性能有着非常明显的作用。聚束极结构如图 5 所示, 材料为耐高温的钼片。聚束极的宽度可以在 1.9~ 2.2 mm 之间调节。

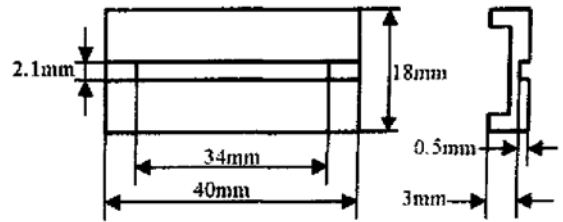


图 5 聚束极结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of assemble beam pole

2. 2. 4 电子枪电源

DK-5H 型电控柜的工作原理如图 6 所示。主要技术参数如下: 高压输出功率: 3 kW; 电压: - 6 kV, - 10 kV 直流两档; 电流: 0~ 0.3 A。灯丝电源功率: 300 W; 电压: 0~ 6 V; 电流: 0~ 50 A。聚束极偏压电源: 相对灯丝电位 0 V, - 200 V, - 250 V, - 300 V (实验中采用 0 V)。偏转电源功率: 16 W ($R_f = 4 \Omega$); 电流: 0~ 2 A; 电压: 0~ 8 V; 电流稳定度: $\leq 1 \times 10^{-3}$; 磁场线圈恒流源: 0~ 2 A 可调。

2. 2. 5 坩埚

坩埚用无氧铜制作, 尺寸为 59 mm \times 21 mm \times 12.5 mm, 内衬 3 mm 厚石墨, 用流量为 $0.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 循环水冷却。通过支架固定在滑动导轨上。

2. 3 磁场

电流通过绕在铁芯上的线圈时, 在铁芯上产生磁场, 通过纯铁将磁场传导到具有一定间隔的两磁极(磁靴)上。如图 7 所示。考虑到漏磁以及边缘效应的影响, 磁靴顶部和根部的磁通不同, 使得磁场的均匀性不能满足要求, 影响电子束的成型。为了充分利用磁铁, 应使得工作气隙中磁场的均匀度不随工作电流的变化而变化, 使每一个磁靴横截面上的磁通密度为一常数。圆形磁靴的边缘形状和尺寸设

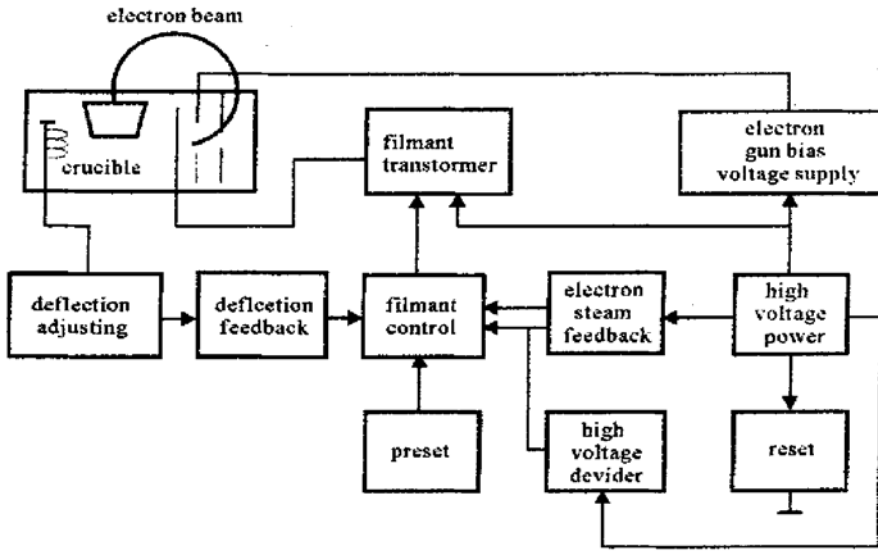


图6 电控柜工作原理示意图

Fig. 6 Sketch map of electrical control system

计最常用的方法是利用罗高斯基理论和经验公式计算^[4,5], 结构示意图见图8。

$$\frac{a}{h} = 0.75 - 0.36 \ln \left[100 \times \frac{\Delta B}{B} \right]$$

$$\frac{x}{h} = \ln \left[\frac{z}{h} + \sqrt{\left(\frac{x}{h} \right)^2 - 1} \right]$$

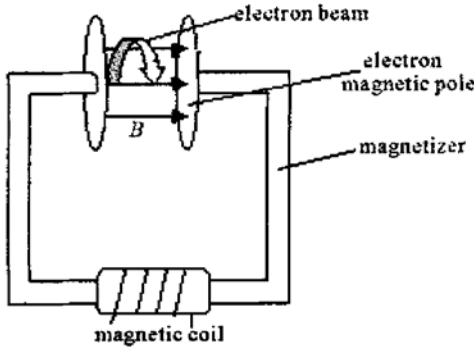


图7 磁场示意图

Fig. 7 Schematic diagram of magnetic field

式中, D_0 为磁靴端部直径, D_1 为磁靴内好场区的宽度, a 为边缘宽度, D 为磁靴根部直径, $\Delta B/B$ 为好场区的精度, $2h$ 为气隙宽度。当电压为 10 kV, 束流为 160 mA 时, 可算出电子回旋半径为 40 mm。根据电子回旋半径和要求的熔池尺寸, 为保证好场区的宽度和磁场的均匀度定出磁靴外直径为 280 mm, 间隙为 80 mm, 磁场线圈总匝数为 1000, 铁芯为圆柱体, 采用纯铁材料, 直径 27 mm, 长度 80 mm。磁场为 8.3×10^{-3} T。

磁靴边缘开有一个直径为 4 mm 的孔, 用于穿过钨丝阴极, 以减小磁靴的间隙尺寸, 根据理论计算^[5], 在离孔中心 5 mm 远处, 对磁场的影响小于 1×10^{-4} T, 30 mm 远处几乎没有影响。对于我们的使用条件, 其影响完全可以忽略。

2.4 真空获得装置

对应不同的真空度, 需要选择不同的真空获得设备。实验中需要的真空度应该至少达到 6.67×10^{-3} Pa。因此, 选用油扩散泵作为真空主泵, 自来水冷却, 采用水压继电器对扩散泵进行保护, 即不开冷却水不能打开油扩散泵。选用旋片式机械泵作为前级泵。表1为实际选用的真空泵规格。

实验中主真空室选用电离真空计, 前级与机械泵接口处选用热偶真空计进行真空度的测量。

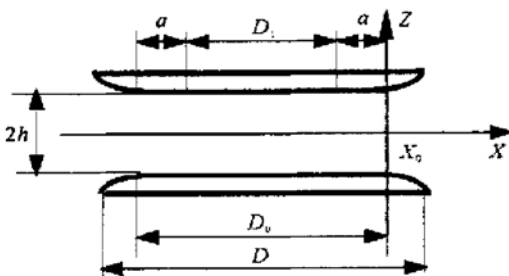


图8 磁靴设计示意图

Fig. 8 Schematic diagram of electromagnet pole design

$$D_0 = D_1 + 2a$$

$$D = (1.10 \sim 1.15) D_0$$

表 1 实际选用的真空泵规格
Table 1 The vacuum pump chosen

	Unit	Rotated vacuum pump(2X-8)	Oil diffusion pump(K-200)
Vacuum-pumping velocity	m ³ /s	0.008	1.500
Highest attained vacuum	Pa	6.67 × 10 ⁻²	6.67 × 10 ⁻⁵
Diameter of pump tube	mm	19	300
Rate of cooling water flow	litre/h	no	300

表 2 磁靴内部磁场强度测量值
Table 2 Magnetic field strength distribution across the magnetic poles

Z / mm	Bz / T / × 10 ⁻⁴				
	φ = 0°	φ = 45°	φ = 90°	φ = 135°	φ = 180°
10	85.4	84.6	84.6	84.6	84.5
20	85.0	84.6	84.5	84.5	84.5
30	84.6	84.6	84.5	84.5	84.5
40	84.5	84.5	84.6	84.5	84.5
50	84.5	84.5	84.5	84.5	84.5
60	84.5	84.5	84.5	84.5	84.5

表 3 磁靴开孔附近的磁场强度测量
Table 3 The measurement of magnetic strength near the peephole of magnetic pole

Angular of measurement (φ / deg)	Bz / T / × 10 ⁻⁴				
	R = 0 mm	R = 10 mm	R = 20 mm	R = 30 mm	R = 40 mm
0	68.0	85.2	84.8	84.5	84.5
90	68.0	85.4	85.0	84.5	84.5
180	68.3	85.4	84.9	84.5	84.5

3 实验

3.1 真空获得实验

实验达到的极限真空度为 2.7 × 10⁻³ Pa, 高于 6.67 × 10⁻³ Pa 的真空度。关闭闸板阀, 进行检漏实验, 测得压强-时间曲线如图 9。

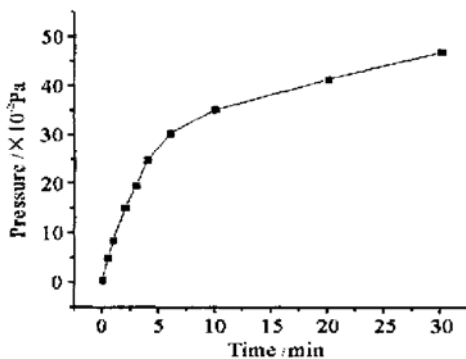


图 9 压强-时间曲线
Fig. 9 Relationship of pressure-time

3.2 磁场测量

3.2.1 磁场均匀性测量

取磁靴中心为坐标原点。水平平行于磁靴方向为 X 轴, 垂直于磁靴方向为 Y 轴。圆形磁靴直径为 280 mm, 空气气隙为 80 mm, 线圈总匝数为 1000, 线圈电流为 1.91 A, 高斯计精度为 1 × 10⁻⁵ T, 以 X 轴正向为 0 角度, 测得磁场强度如表 2 所示。由表 2 可以看到, 磁场均匀性为 ΔB/B = 1.05%。

3.2.2 磁靴开孔对磁场均匀性的影响

为了满足实验时的一些要求, 在磁靴上开了一个直径为 4 mm 的通孔。理论计算表明, 磁靴开孔对磁场均匀度的影响不超过 30 mm 范围。我们对此进行了实验验证。由表 3 可以看出, 在距离磁靴开孔 30 mm 处, 开孔对磁场均匀度的影响完全可以忽略不计。

3.3 金属蒸发实验

当系统的真空度高于 7 × 10⁻³ Pa 时便可进行金属蒸发实验。实验条件为: 束流强度: 160 mA; 电压: 10 kV; 电子枪功率: 1.6 kW; 最大功率密度: 1.90 kW/cm²。

在束流加到 90 mA 时观察到钨开始发红;当束流达到 150 mA 时能够形成比较稳定的,长度约为 22 mm,宽度约为 4 mm 的熔池。

参 考 文 献

- 1 Wang Dewu. Laser Isotope Separation Theory and It's Applications [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999. 4~ 18 (in Chinese)
- 2 Zhang Yanlong, Wang Dewu, Bao Chengyu. Computer aided design and experimental research of linear electron gun [J]. *Journal of Tsinghua University* (清华大学学报), 1998, 38

(11): 111~ 113 (in Chinese)

- 3 Du Yingge. Design and Research of Atomic Vapor Evaporator [D]. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, 2001. 15~ 18 (in Chinese)
- 4 Li Quangfeng. Numerical Calculation of Electromagnetic Field and Design of Electromagnets [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 166~ 180 (in Chinese)
- 5 Du Yingge, Bao Chengyu, Zhao Haiyu. Research of the drilled magnetic field, C, Zhao Xuefan, Proceedings of international ninth Beijing conference and exhibition on instrumental analysis, B. Mass Spectrometry [M]. Beijing: Peking University Press, 2001, B27, Oct. 17~ 21

LASERS 16 Shanghai' 2003 第十六届全国激光学术会议征文通知

中国光学学会激光专业委员会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十六届全国激光学术会议,定于 2003 年 10 月在上海举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名两院院士和著名专家到会作特邀报告,同时各分会将安排高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。

上海是全国著名的经济文化中心,拥有众多激光研究、应用、开发的研究所、高校和企业。近年来涌现许多著名的现代景观,如东方明珠电视塔、金茂大厦 APEC 会址以及世界首列运营性磁悬浮列车等。热情欢迎激光领域研究与开发的专家学者光临会议。

会议主办单位:中国电子学会,中国光学学会;
会议承办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所;
会议时间:2003 年 10 月中下旬;会议地点:上海;
名誉主席:王大珩;主席:范滇元、周寿桓;副主席:朱健强、梅遂生、姚建铨、许祖彦、王益德;秘书长:田守云。

征稿范围:1) 激光物理;2) 超短脉冲激光与非线性光学;3) 全固态激光器与非线性光学;4) 光通

讯有源及无源器件;5) 工业激光及其应用;6) 医用激光及激光与生物组织相互作用;7) 光束传输、控制及光束质量;8) 激光光学材料、薄膜及元器件;9) 其他相关领域。

征文要求:需提交 500 字摘要和 300 字提要各一份,分别用于审稿和出版会议指南。摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括目的、方法、结果、结论等内容。请用第三人称叙述,不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文。论文截稿期为 2003 年 6 月 30 日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail 等)、关键词 3~ 6 个。用宋体小四号字按 word 格式编排,以 E-mail 附件方式发送,发送至 laser2003@siom.ac.cn,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮件,如发送 E-mail 确有困难者,可书面邮寄至上海 800-211 信箱《中国激光》编辑部收,邮编 201800,请在信封上标明“会议投稿”及所属征文范围第几类,联系电话:021-69918016,网址:www.siom.ac.cn。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。

2003 年 5 月