

文章编号: 0258-7025(2004)05-0538-05

# 毛细管快放电中的管壁烧蚀

程元丽<sup>1</sup>, 赵永蓬<sup>1</sup>, 肖亦凡<sup>1</sup>, 刘 鹏<sup>1</sup>, 王 骐<sup>1</sup>, 杨大为<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>2</sup> 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要** 介绍了一台毛细管快放电软 X 射线激光实验装置, 包括 Marx 发生器, Blumlein 传输线和毛细管放电室等。在充入相同气压的气体(70~90 Pa)和相同主脉冲(电流峰值 30 kA, 上升沿 30 ns)放电条件下, 通过观测其放电后的真空紫外波段辐射, 对分别采用该装置固有的幅值为 7 kA 和外加的幅值为 30 A 的两种预脉冲时, 聚乙烯毛细管和陶瓷毛细管的管壁烧蚀情况进行了研究。实验结果表明, 采用 7 kA 预脉冲和聚乙烯毛细管时, 管壁烧蚀量大, 导致真空紫外波段的积分谱呈连续状; 而采用 10~30 A 的预脉冲和高纯度陶瓷毛细管时, 则有效地减少了管壁烧蚀量, 谱线分辨性好。为进一步提高 X 射线激光能量转换效率、获得均匀等离子体柱、进而获得激光放大提供了依据。

**关键词** 激光技术; 管壁烧蚀; 毛细管放电; X 射线激光

**中图分类号** TN 248 **文献标识码** A

## Experimental Investigation on Ablation Character of Capillary Discharge

CHENG Yuan-li<sup>1</sup>, ZHAO Yong-peng<sup>1</sup>, XIAO Yi-fan<sup>1</sup>,  
LIU Peng<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, YANG Da-wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China  
<sup>2</sup> China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

**Abstract** A capillary discharge setup, consisting of a Marx generator system, main switch, Blumlein transmission line and pre-pulse circuit, has been developed. This device is designed to excite electron-collision pumping scheme XUV laser in Ne-like Ar at 46.9 nm. The ablation characteristics of the discharged capillary are experimentally investigated by measuring VUV emission from the capillary discharged. The ablation of capillary wall for polythene and alumina material is studied at inherent pre-pulse (7 kA) of the Blumlein transition line (BTL) and at pre-pulse of 20~30 A respectively under the same main current of 30 kA having a rising time of 30 ns. The reason of the plentiful ablation is that there exist high electric fields for inherent pre-pulse, which cause an inhomogenous channel spark near the wall. The experiment results indicate that the inherent pre-pulse of BTL on grounding inductance is too large to create uniform plasma columns. In the case of 20 A-pre-pulse the background emission decreased remarkably and the radiations is discriminable. In the experiments, only when the pre-pulse is less than 100 A, for alumina capillary, can the ablation be greatly reduced.

**Key words** laser technique; ablation characteristics of discharged capillary; capillary discharge; X-ray laser

## 1 引 言

毛细管放电最初是被用来作为研究 X 射线光

谱, X 射线光刻和 X 射线显微术的 X 射线源。毛细管放电是指直径为毫米量级, 长度为几厘米至几十厘米的绝缘管两端加上快脉冲高电压。1967 年

收稿日期: 2003-08-14; 收到修改稿日期: 2003-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60038010)和国家 863 计划(2002AA84ts23)资助项目。

作者简介: 程元丽(1971—), 女, 蒙族, 哈尔滨工业大学博士生, 讲师, 主要从事 X 射线激光及等离子体诊断研究。E-mail: cy1\_ice@hotmail.com

Bogen 建立的毛细管放电装置中,毛细管长 2 cm,内径 2 mm,放电电压 40 kV,获得了软 X 射线输出。1988 年美国 Colorado 大学的 Rocca 教授,提出利用毛细管快放电产生的轴向均匀等离子体柱作为增益介质,直接产生软 X 射线放大的方案。1994 年 Rocca 等成功地获得类氦氩 46.9 nm 激光输出<sup>[1]</sup>;在 1999 年,获得的 46.9 nm 激光输出近 1 mJ,重复频率达到了 4 Hz<sup>[2]</sup>。目前利用毛细管放电获得强的 EUV 辐射作为 X 射线光刻光源又成为新的研究热点<sup>[3]</sup>。

能否获得软 X 射线激光的输出,关键在于能否形成均匀、高温、高电离的等离子体柱,而此与毛细管的管壁烧蚀和预脉冲的大小密切相关<sup>[4]</sup>。在毛细管放电 X 光激光的研究中,预脉冲的作用是在主脉冲之前,将氩气电离成 +1, +2 价氩离子,可以提高主脉冲的能量传输效率和等离子体柱的均匀性,适当的预脉冲是产生 X 光激光的必要条件。国外文献资料对毛细管的管壁烧蚀与预脉冲的关系提及甚少。我们在最初设计装置时,初步考虑把 Blumlein 传输线充电时,由于接地电感的存在而在毛细管上产生的预脉冲电压作为预脉冲。但实验发现,该预脉冲幅值过高(7 kA),管壁和电极烧蚀严重,致使气体谱线被湮没。随后通过去除 Blumlein 传输线固有的预脉冲并外加一个幅值为几十安培的预脉冲使管壁烧蚀量大大减小,为获得均匀的等离子体柱、检测气体谱线提供了可能。

## 2 毛细管快放电实验装置及实验条件

毛细管放电实验装置由四部分组成<sup>[5]</sup>,包括 Marx 发生器(输出电压 240~300 kV),Blumlein 传输线,毛细管放电室和真空及检测系统,其等效电路如图 1 所示。实验时,先由预脉冲将毛细管内的气体初步电离;Marx 发生器对 Blumlein 传输线进行脉冲谐振充电,充电时间大约 1  $\mu$ s 左右,当传输线充电到它的峰值电压 90%~95%时,主开关接通,在预脉冲过后几微秒,形成一个快前沿(30 ns 左右)高压脉冲加到毛细管负载上;毛细管内预电离形成的等离子体在快脉冲大电流的作用下,进行箍缩,形成高密度、高温、高电离度的等离子体柱,其中的电子碰撞过程形成相应能级的粒子数反转,在适当的条件下即可产生软 X 射线激光。

在 Blumlein 传输线充电时,由于接地电感的存在,主脉冲到来前几百纳秒,在毛细管两端产生一幅

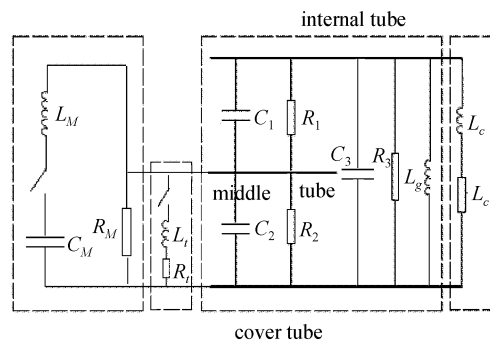


图 1 主脉冲对毛细管放电的等效电路图

Fig. 1 Equivalent electrical circuit of discharge circuit from Marx generator to Blumlein line

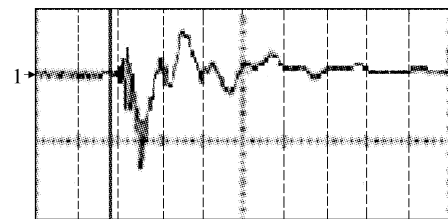


图 2 由于接地电感的存在而产生的电流波形

Fig. 2 Current waveforms of inherent pre-pulse due to grounded inductance

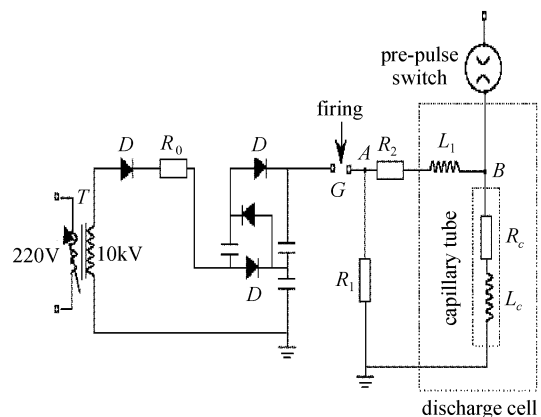


图 3 预脉冲电路图

Fig. 3 Equivalent electrical circuit of pre-pulse

值为 7 kA,脉宽为 100 ns 的震荡波,如图 2 所示,最初考虑用其作为预脉冲。

另一预脉冲装置包括预脉冲电源和预脉冲电路(见图 3),实验中采用倍压电路来提高预脉冲电压,高压变压器的最大输出电压为 10 kV,预脉冲的最大输出电压达 20 kV。通过一个延时触发电路,来完成预脉冲和主脉冲的同步问题,与主脉冲间的延迟时间在 3~50  $\mu$ s 连续可调,幅值为 30~10 A。而原有的预脉冲通过一个预脉冲开关进行隔离,该开关在原有的预脉冲(60 kV, 7 kA)到来时不导通,主

脉冲(200~300 kV)来时导通。新的预脉冲通过一个隔离电感耦合到毛细管上,隔离电感可以让近直流的预脉冲电流耦合到毛细管上,而隔离掉通过预脉冲开关的主脉冲,使其不能耦合到预脉冲电源上,避免了对预脉冲电源的破坏。预脉冲电压和电流波形如图 4 所示。

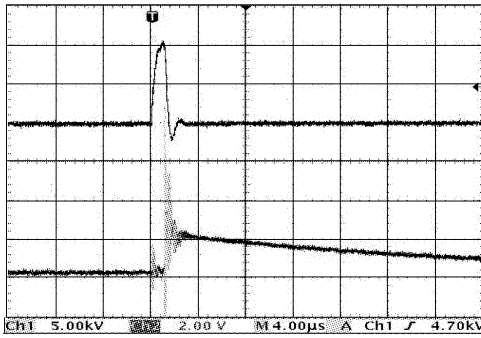


图 4 20 Pa 氩气预脉冲放电的电压和电流波形  
Fig. 4 Voltage and current waveforms of pre-pulse

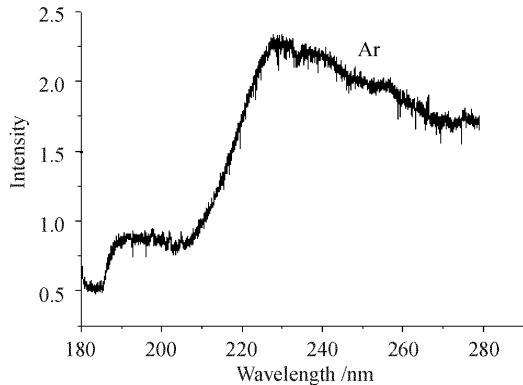


图 5 7 kA 预脉冲和 40 kA 主脉冲对充有氩气的聚乙烯毛细管放电的真空紫外谱(中心波长 240 nm)  
Fig. 5 Spectra of Ar gas discharged at pre-pulse of 7 kA and main pulse of 40 kA in polyethylene capillary

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 Blumlein 传输线固有的预脉冲烧蚀

Blumlein 传输线固有预脉冲是幅值为 7 kA,脉宽为 100 ns 的震荡波,与主脉冲的时间间隔为几百纳秒。在此预、主脉冲条件下研究了内径为 2 mm 的聚乙烯和高纯度(99.9%)陶瓷毛细管的管壁烧蚀情况。实验时,Marx 发生器的充电电压为 22.39 kV,聚乙烯毛细管长 12 cm,充氩气 70~90 Pa,VM502 真空紫外单色仪改装而成的罗兰圆谱仪的中心波长为 240 nm,狭缝 50 μm。图 5 给出了该预脉冲和主脉冲对聚乙烯毛细管放电的真空紫外辐射谱。从图中可看出,谱线呈连续谱状,有很强的背景

辐射,谱线不能分辨;而且实验发现,放电后毛细管内壁和辐射传输通道的内侧有大量黑色碳粉。以上两点均说明,高峰值预脉冲条件下,聚乙烯毛细管放电的管壁烧蚀严重。图 6 给出的是相同实验条件下陶瓷毛细管放电的结果,与聚乙烯毛细管相比,谱线包络能够分辨,但背景辐射仍然很强,谱线密集。通过镍(Ni)空心阴极灯的 232.0 nm 谱线对图 6 进行了标定,可以看出绝大部分谱线来源于陶瓷材料铝(Al)和氧(O)的二价和三价离子,少量谱线来源于铜电极。

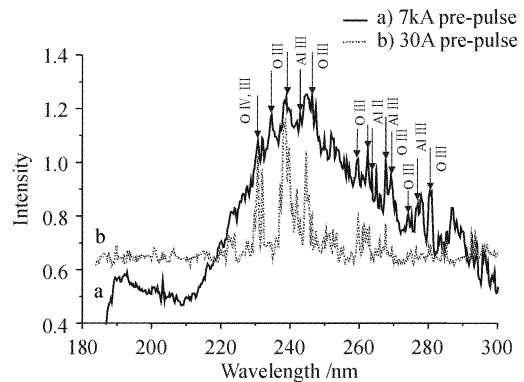


图 6 7 kA 预脉冲和 40 kA 主脉冲对充氩气陶瓷毛细管放电的真空紫外谱(曲线 a)和 30 A 预脉冲的结果(曲线 b)

Fig. 6 Spectra of Ar gas discharged in alumina capillary curve a: at pre-pulse of 7 kA; curve b: at pre-pulse of 30 A

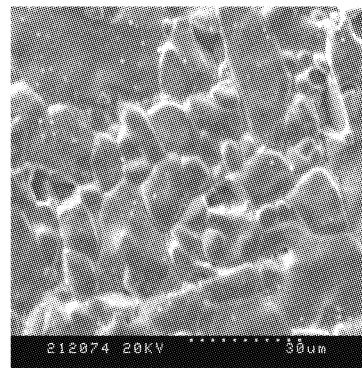


图 7 放电后毛细管内表面的电镜图像  
Fig. 7 Image of the inner surface of capillary after discharged

为了进一步证实烧蚀物质来源于管壁和电极,测试了多次放电后的毛细管内表面,图 7 是毛细管内表面的微观图像。通过测试得知上面的白点状物质是铜锌合金电极高压放电产生的碎片。测试毛细管内表面所含物质的谱图 8 表明,其内表面上附着大量的铜、锌、硅、铝等物质,分别来源于铜锌合金电

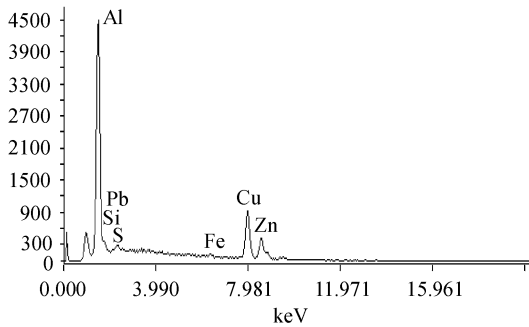


图 8 多次放电后毛细管内表面的沉积物质谱图  
Fig. 8 Spectra for inner surface of capillary after discharged

极和铝陶瓷毛细管。而毛细管放电后观察到的辐射谱也主要以这些物质的谱线为主。

分析以上结果的主要原因在于, 高数值预脉冲作用下, 存在较高的电场, 在毛细管管壁附近产生了不均匀的击穿通道, 在主脉冲到来时没有形成均匀的放电通道, 致使管壁烧蚀严重, 所以谱线主要来源于烧蚀物质。而无预脉冲的放电, 有可能导致在毛细管外侧的坍塌, 破坏毛细管<sup>[5,6]</sup>。

### 3.2 改造后的预脉冲烧蚀情况

与 3.1 相同的主脉冲条件下, 采用新的预脉冲, 其幅值为 30 A, 预主脉冲延迟时间为 10  $\mu$ s, 又观测了充氩气(Ar)陶瓷毛细管放电的辐射谱, 结果如图 6 的曲线 b 所示。可以看出 30 A 预脉冲时的谱线包络与 7 kA 时的基本相同, 均源于管壁和电极烧蚀物质, 但 30 A 预脉冲时的背景辐射大幅减小, 谱线可分辨性强, 说明 30 A 预脉冲时管壁烧蚀量大大减小了。

对充有氮气的毛细管放电获得了与充氩气时的相同结论。图 9 是 7 kA 预脉冲条件下的氮气放电结果, 与相同条件下氩气放电的谱线包络基本相同, 绝大部分谱线均来源于烧蚀物质。而采用 30 A 预脉冲时的烧蚀谱线明显减少, 如图 10 所示, 在 180 ~ 280 nm 区域仅观测到几根烧蚀物质谱。以上结果进一步说明幅值为 30 A, 与主脉冲延迟时间为 10  $\mu$ s 的预脉冲有助于大幅减少管壁烧蚀量。

而对比相同放电条件下, 对氮气和氩气的放电结果图 6 曲线 b 和图 10, 可以发现氮气的烧蚀谱较相同放电条件下氩气的烧蚀谱减少很多。实验过程中, 在 10 ~ 20 kV 预脉冲电压击穿充氮气毛细管时, 整个管子通亮, 而相同的预脉冲击穿同样压强的氩气时, 毛细管内只有一丝亮, 不象氮气击穿那样

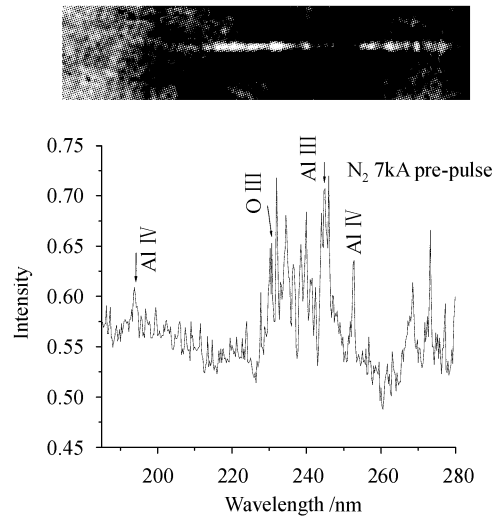


图 9 7 kA 预脉冲对充 80 Pa 氮气的陶瓷毛细管快放电获得的真空紫外谱  
Fig. 9 Spectra of  $N_2$  gas discharged at pre-pulse of 7 kA and main pulse of 40 kA in polyethylene capillary

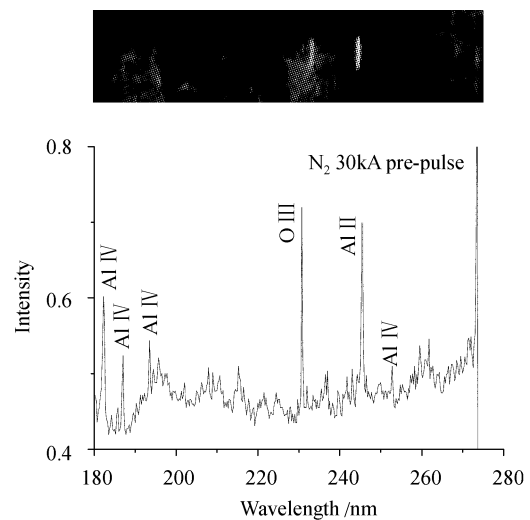


图 10 30 A 预脉冲对充 80 Pa 氮气的陶瓷毛细管快放电获得的真空紫外谱  
Fig. 10 Spectra of  $N_2$  gas discharged at pre-pulse of 30 A and main pulse of 40 kA in alumina capillary

通亮。说明在此预脉冲作用下, 氮气在毛细管内是被均匀击穿的, 所以主脉冲到来后能够产生均匀的 Z 箍缩, 使整个气柱快速脱离管壁, 大幅减少管壁烧蚀量。而氩气是惰性气体, 电离电位高, 不易被击穿, 在此预脉冲放电条件下, 整个管子没有被均匀击穿, 所以烧蚀量较氮气时的多。如何选择能使 50 ~ 80 Pa 氩气均匀击穿的预脉冲是今后实验中仍需要继续探索的一个问题。

由于气体的谱线较弱, 在没有放大、胶片记录的

情况下,还没有观测到气体的谱线。拟采用即将完成的门控 MCP 系统,该系统最小门控为 5 ns,对放电过程的不同时段取信号,可以将杂质谱的影响降低到最小,而对气体谱有效放大,以进一步确定等离子体状态的变化。

## 4 结 论

实验结果表明,预脉冲的幅值和毛细管的材料对放电过程中的烧蚀量起着决定性的作用,预脉冲电流过高或过低都不好,存在着一个最佳的预脉冲放电电流,大约在 10~50 A。过高的预脉冲将导致在毛细管管壁附近产生不均匀击穿通道,致使管壁烧蚀严重。对比氮气和氩气放电的实验结果,如果预脉冲能够将气体均匀击穿,则主脉冲到来后能够形成均匀稳定的压缩,有效地减少管壁烧蚀。

## 参 考 文 献

- 1 J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(16):2192~2195
- 2 C. D. Macchietto, B. R. Benware, J. J. Rocca. Generation of millijoule-level soft-X-ray laser pulses at 4-Hz repetition rate in a highly saturated tabletop capillary discharge amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1115~1117
- 3 T. Boboc, R. Bischoff, H. Langhoff. Emission in the extreme ultraviolet by xenon excited in a capillary discharge [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**(16):2512~2517
- 4 Wang Qi, Cheng Yuanli, Zhang Xinlu *et al.*. Study on capillary discharge-pumped soft X-ray laser in Ne-like Ar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):97~100  
王 骐,程元丽,张新陆等. 毛细管放电激励类氩-氩离子 X 光激光研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):97~100
- 5 A. Ben-Kish, M. Shuker, R. A. Nemirowsky *et al.*. Investigating the dynamics of fast capillary discharges leads to soft X-ray laser realization at 46.9 nm [J]. *J. Phys. IV France*, 2001, **11**:Pr2~99
- 6 S. V. Kukhlevsky, J. Kaiser, L. Palladino *et al.*. Physical processes in high-density ablation-controlled capillary plasmas [J]. *Phys. Lett. A*, 1999, **258**(4~6):335~341

\*\*\*\*\*

(上接封四)

中没有出现的,但作为主要研究对象的事或物质的名称,如有需要,还可以列出作者认为有利于检索和文献利用的第五、第六个等关键词。

**7. 图表** 图要设计美观,大小适中,尺寸一般为 8cm×10cm 以内,线条均匀,主辅线分明,粗线一般为 0.25~0.5mm,细线一般为粗线的 1/2,图中主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。**图表文字:**图题、表题须中英文对照,图面、表面一律用英文。

**8. 参考文献** 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献请用英文表示,如原文献为其他文种,请在该文献最后用括号注明(中文文献请在英文后同时标注相应的中文内容),并给出该文献所属的专著或刊物中文名称。每条文献的顺序和标点如下:

专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名). 文献题名. 版本(专著用),出版地:出版者,出版年. 起止页码;

期刊[J]——作者(三名). 论文题目[J]. 刊名,出版年,卷(期):起止页码;

专利[P]——专利申请者. 专利题目[P]. 专利国别,专利文献种类,专利号,出版日期;

文集[C]——作者(三名). 论文题目[C]. 编者,论文集名,出版地:出版者,年. 起止页码。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》。

**9. 基金资助** 论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

**10. 版面费** 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

**11. 版权** 录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 2 册,抽印本 10 份。

**12. 本刊已入编**《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据库,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。

**特别声明:**凡在国内外正式出版的刊物上登载过的稿件,本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者,本刊三年内不接受其稿件,并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者,均视作接受上述各项规定,本刊不再特别声明。

《中国激光》编辑部

2004 年 5 月