

文章编号: 0258-7025(2006)10-1309-05

# 激光二极管抽运的自拉曼 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器

贾 鹏, 张行愚, 王青圃, 丁双红, 苏富芳

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

**摘要** 研究了激光二极管(LD)抽运的自拉曼 Nd:YVO<sub>4</sub>调 Q 激光器的特性。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体同时作为激光介质和拉曼晶体,通过声光调 Q 技术,产生了 1176 nm 的拉曼激光。测量了平均输出功率、脉冲宽度和单脉冲能量随抽运功率和脉冲重复率的变化。典型的 1064 nm 基频光和 1176 nm 拉曼光脉冲的脉冲宽度分别为 26.3 ns 和 9.0 ns。在脉冲重复率为 20 kHz, 抽运功率为 8.46 W 时,产生了平均功率为 0.384 W 的 1176 nm 光的输出,光-光转换效率为 4.54%。使用速率方程对自拉曼 Nd:YVO<sub>4</sub>调 Q 激光器特性进行了理论研究,把脉冲重复率为 10 kHz, 20 kHz, 30 kHz 时拉曼光单脉冲能量和脉冲宽度的实验值与理论值进行了比较,结果基本相符。

**关键词** 激光器;拉曼激光器;受激拉曼散射;Nd:YVO<sub>4</sub>晶体;调 Q

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Laser Diode-Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Self-Stimulated Raman Laser

JIA Peng, ZHANG Xing-yu, WANG Qing-pu, DING Shuang-hong, SU Fu-fang

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** A 1176 nm Raman laser is obtained by use of self-frequency Raman conversion in a laser diode-pumped actively acousto-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> 1064 nm laser. The characteristics including the average output power, pulse width and pulse energy versus incident pump power and pulse repetition rates are measured. The widths of the typical fundamental pulses at 1064 nm and the Raman pulses at 1176 nm are 26.3 ns and 9.0 ns, respectively. At a repetition rate of 20 kHz and an incident pump power of 8.46 W, an average output power of 0.384 W at 1176 nm and an optical-to-optical conversion efficiency of 4.54% are obtained. The rate equations are used to describe the performance of the self-Raman actively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser. Experimentally measured and theoretically calculated pulse energies and pulse widths at 1176 nm for the pulse repetition rates of 10, 20, and 30 kHz are compared, the theoretical results are in agreement with the experimental results on the whole.

**Key words** lasers; Raman laser; stimulated Raman scattering; Nd:YVO<sub>4</sub> crystal; Q-switching

## 1 引 言

近年来,激光二极管(LD)抽运的固体激光器成为激光领域研究的热点之一<sup>[1,2]</sup>,它具有结构紧凑、效率高、光束质量好等优点。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体有受激发射面大、吸收带宽比较宽、吸收系数高、线偏输出等优点,特别适用于激光二极管抽运的固体激光器,从而成为该领域应用最为广泛的激光晶体之一<sup>[3~7]</sup>。不仅如此,2001年 YVO<sub>4</sub>和 GdVO<sub>4</sub>这两

种晶体被发现还是良好的拉曼晶体<sup>[8]</sup>,在 1 μm 附近拉曼增益系数超过了 4.5 cm/GW, Nd:YVO<sub>4</sub>晶体产生的拉曼频移为 890 cm<sup>-1</sup>和 815 cm<sup>-1</sup>,可以应用于可见光和近红外区,尤其是掺 Nd 的 YVO<sub>4</sub>和 GdVO<sub>4</sub>晶体还可以同时作为激光介质和拉曼晶体而实现自拉曼转换效应。2004年 Y. F. Chen 实现了主动和被动调 Q 情况下激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的自拉曼效应实验,包括 1064 ~

收稿日期:2006-03-14;收到修改稿日期:2006-05-16

基金项目:山东省科学技术发展计划重点项目(2004GG2203098)和教育部留学回国人员科研启动基金资助课题。

作者简介:贾 鹏(1979—),男,山东莒县人,山东大学信息科学与工程学院光学工程专业硕士研究生,主要从事激光物理与技术方面的研究。E-mail:jiapeng1979@sdu.edu.cn

导师简介:张行愚(1963—),男,山东邹平人,山东大学信息科学与工程学院教授,博士生导师,长期从事激光物理、光电子学方面的教学与科研工作。E-mail:xyz@sdu.edu.cn

1176 nm光, 1066.7 ~ 1178.6 nm光以及 1342 ~ 1525 nm光的拉曼转换<sup>[9~11]</sup>。

本文对激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的自拉曼特性进行了进一步研究, 详细测量了主动调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>自拉曼激光器在不同抽运功率和不同脉冲重复率下的 1176 nm拉曼光的平均输出功率、脉冲宽度和单脉冲能量。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,  $M_1$  镜和  $M_2$  镜构成了 1064 nm的基频光和 1176 nm的拉曼光的谐振腔。其中  $M_1$  镜既是 808 nm抽运光的输入镜, 又是谐振腔的后腔镜, 对 1064 nm光的反射率为 99.8%, 对 1176 nm光的反射率为 97.5%, 对 808 nm抽运光的透过率为 90.0%, 曲率半径为 100 cm。输出耦合镜  $M_2$  对 1064 nm光的反射率为 99.8%, 对 1176 nm拉曼光的反射率为 93.0%。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体同时作为激光介质和拉曼晶体, 掺 Nd 原子数分数为 0.2%, 尺寸为 3 mm×3 mm×15 mm, 沿  $a$  轴方向切割, 前后端面都镀有 1064 nm和 1176 nm光的增透膜, 前端面镀有 808 nm光的增透膜, Nd:YVO<sub>4</sub>晶体与后腔镜的间距为 1 cm, 为了达到良好的冷却效果, 将 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体用铝箔包裹并放置在带有水冷装置的铜块内。声光调 Q 晶体长度为 2 cm, 前后端面镀有 1.0~1.35  $\mu$ m光的增透膜。激光二极管抽运输出光为 808 nm, 光纤芯径尺寸为 400  $\mu$ m, 最大的抽运功率为 32.6 W, 聚光镜焦距为 1.25 cm。整个激光谐振腔长仅有 8 cm。功率测量用 EPM2000 型激光功率能量计, 波形测量用 InGaAs PIN 光电二极管(在 1.0~1.65  $\mu$ m波段具有高的响应度)和 Tektronix TDS 3052B 存储示波器, 光谱测量用 AQ6317C 型光谱分析仪。

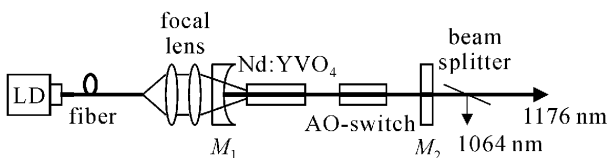


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

## 3 实验结果及理论分析

图 2(a), (b) 分别给出了典型的 1064 nm 基频光和 1176 nm拉曼光的脉冲波形。脉冲宽度分别为 26.3 ns和 9.0 ns。图 3 给出了 1064 nm基频光和

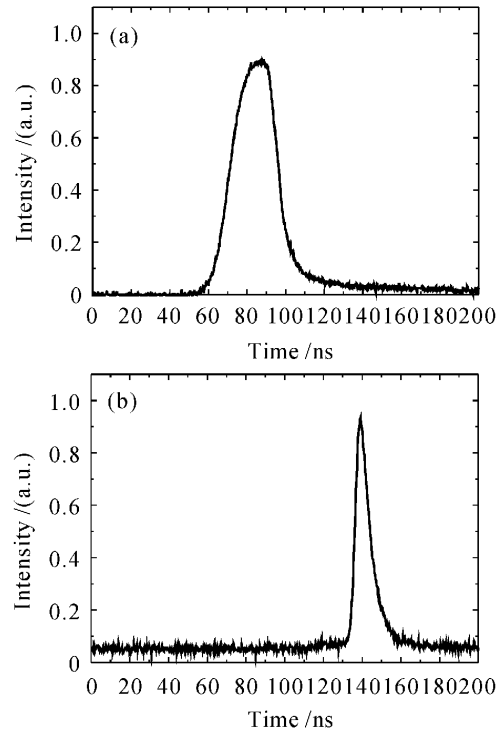


图 2 1064 nm 基频光(a)和 1176 nm 拉曼光(b)的脉冲波形

Fig. 2 Typical oscilloscope trace for the fundamental pulse of 1064 nm (a) and for the Raman pulse of 1176 nm (b)

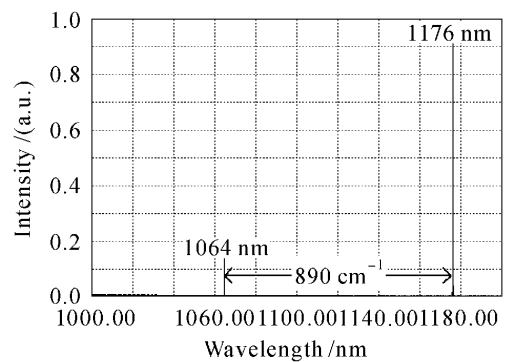


图 3 1064 nm 基频光和 1176 nm 拉曼光的光谱图  
Fig. 3 Optical spectrum for the fundamental and Raman lasers

1176 nm拉曼光的光谱图, 两谱线之间的间隔与 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的拉曼效应产生的频移 890  $\text{cm}^{-1}$  相一致。通过调节声光调 Q 晶体, 测得了在脉冲重复率为 10 kHz, 20 kHz, 30 kHz时的一阶 Stokes 拉曼光的平均输出功率与抽运功率的关系, 如图 4(a) 所示, 可以看出, 1176 nm拉曼光的阈值在 3~5 W 之间, 随着脉冲重复率的增大, 阈值也增加, 这是由于拉曼转换效率随着基频光的峰值功率的增加而增大, 所以随着脉冲重复率的增加, 峰值功率降低, 拉曼转换效率减小, 导致阈值增大。图 4(b) 给出了

1176 nm 拉曼光在脉冲重复率为 10 kHz, 20 kHz, 30 kHz 时的脉冲宽度与抽运功率的关系, 可以看出, 随着抽运功率的增加, 拉曼光的脉冲宽度逐渐减小。在 20 kHz 的重复率下, 得到 1176 nm 拉曼光的最大输出功率为 0.384 W, 斜率效率为 8.1%, 与抽运光功率相比, 拉曼转换效率为 4.54%。

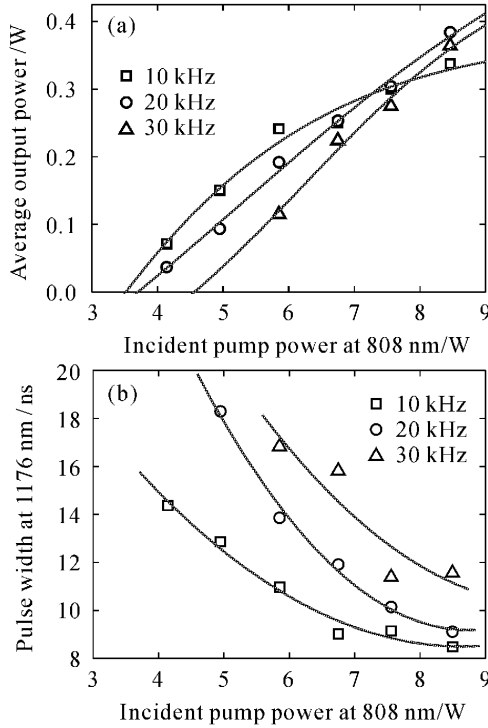


图 4 脉冲重复率不同时, 1176 nm 拉曼光的平均输出功率(a)和脉冲宽度(b)与抽运功率的关系

□, ○, △: 实验数据; 实线: 拟合曲线

Fig. 4 Average output power (a) and pulse width (b) with respect to the incident pump power at 1176 nm for the pulse repetition rates of 10, 20, 30 kHz  
□, ○, △: experimental results; solid lines: fitted curves

描述腔内自拉曼转换的主动调 Q 激光器的速率方程为<sup>[12,13]</sup>

$$\frac{d\phi_L}{dt} = \frac{l_c}{L_c} c \phi_L \sigma \Delta n - \frac{\phi_L}{t_L} - \frac{l_c}{L_c} g \phi_L \phi_R h \nu_L c^2, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_R}{dt} = \frac{l_c}{L_c} g \phi_L \phi_R h \nu_L c^2 - \frac{\phi_R}{t_R} + k_{sp} \phi_L, \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\gamma \Delta n \sigma c \phi_L - \frac{\Delta n}{t_{sp}}, \quad (3)$$

其中  $\phi_L$  和  $\phi_R$  为基频光和拉曼光的腔内光子数密度,  $l_c$  为激光介质长度,  $L_c$  为腔的光学长度,  $c$  为光速,  $\sigma$  为激光介质的受激发射截面,  $\Delta n$  为反转粒子数密度,  $g$  为拉曼增益系数,  $h$  为普朗克常数,  $\nu_L$  为 1064 nm 基频光的频率,  $k_{sp}$  为自发拉曼散射因子,  $\gamma$  为反转因子,  $t_{sp}$  为激光介质的上能级寿命,  $t_L$  和  $t_R$  分别为基频光和拉曼光的光子寿命

$$t_L = t_r / \left[ \ln \left( \frac{1}{R_{L1} \times R_{L2}} \right) + L_a \right], \quad (4)$$

$$t_R = t_r / \left[ \ln \left( \frac{1}{R_{R1} \times R_{R2}} \right) + L_a \right], \quad (5)$$

其中  $t_r = 2L_c/c$  为光在腔内的往返时间,  $R_L$  和  $R_R$  分别为腔镜对基频光和拉曼光的反射率, 1 和 2 代表前后两个腔镜,  $L_a$  为腔内除透射以外的往返净损耗。

输出拉曼光功率和能量可以写为

$$P_{out} = \frac{\phi_R(t)}{t_r} \ln \left( \frac{1}{R_{R1} \times R_{R2}} \right) L_c S h \nu_R, \quad (6)$$

$$E_{out} = \int_0^{t_b} P_{out} dt, \quad (7)$$

其中  $S = \pi w^2$  为光束截面积,  $w \approx 300 \mu\text{m}$ , 为拉曼光的光束半径,  $\nu_R$  为拉曼光的频率,  $t_b$  为调 Q 脉冲结束时间, 脉冲宽度可由  $P_{out}$  随时间变化波形的半宽度获得。利用方程(1)~(3)计算了不同抽运功率和脉冲重复率时拉曼光的单脉冲能量和脉冲宽度, 计算理论结果所用参量如表 1 所示, 理论结果和实验结果的比较如表 2 和表 3 所示, 实验数据与理论数据大致相符, 脉冲能量和脉冲宽度随抽运功率的变化趋势相一致, 但脉冲能量的理论值高于实验值, 脉冲宽度的理论值低于实验值。原因在于: 1) 速率方程(1)的最后一项是表示由于拉曼转换使基频光光子数密度的减小率, 速率方程(2)的第一项是由于拉曼转换使拉曼光光子数的增长率, 二者绝对率相等。在推导该速率方程时, 假设基频光在腔内往返一周的时间内保持为常量<sup>[12~14]</sup>, 这实际上是不可能的, 如果考虑基频光在腔内往返一周时间内的变化, 该项应该小于速率方程(2)的第一项, 即速率方程(2)的第一项大于实际情况, 从而造成脉冲能量的理论值高于实验值, 脉冲宽度的理论值低于实验值。2) Nd:YVO<sub>4</sub> 的激发态上转换效应没有考虑。如果考虑上转换效应, 初始反转粒子数密度就要相应减小,

表 1 速率方程中所用参数的具体数值

Table 1 Values of the parameters used in the rate equations

Parameter	Value
$l_c$ / cm	1.5
$L_c$ / cm	9.4
$c$ / (m/s)	$3 \times 10^8$
$\sigma$ / cm <sup>2</sup>	$2.5 \times 10^{-18}$ <sup>[15]</sup>
$L_a$	0.05
$g$ / (cm/GW)	$4.5$ <sup>[8]</sup>
$h$ / (J · s)	$6.626 \times 10^{-34}$
$k_{sp}$ / s <sup>-1</sup>	$2 \times 10^{-10}$ <sup>[13]</sup>
$\gamma$	$0.71$ <sup>[15]</sup>
$t_{sp}$ / μs	100

计算得到的脉冲能量也要减小。3) 理论计算中使用的各参量的取值不一定完全符合实际情况,如拉曼光的  $L_a$  假设与基频光的  $L_a$  相等。另外,该速率方程采用的是平面波近似,没有考虑激光光束的空

间分布,热透镜效应对谐振腔的影响只考虑了平均效果,这些也都引入一定的误差。但总的说来,使用速率方程能够大致描述激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的自拉曼特性。

表 2 脉冲重复率为 10 kHz, 20 kHz, 30 kHz 时拉曼光单脉冲能量的实验值与理论值  
Table 2 Experimentally measured and theoretically calculated pulse energy at 1176 nm for the pulse repetition rates of 10, 20, and 30 kHz

Pump power /W	Pulse energy / $\mu$ J					
	10 kHz		20 kHz		30 kHz	
	Experiment	Theory	Experiment	Theory	Experiment	Theory
4.14	7.1	17.8	1.8	7.6		
4.95	15.0	21.4	4.7	10.2		
5.85	24.1	25.6	8.6	12.9	3.8	8.3
6.75	25.0	29.6	12.7	16.3	7.5	10.2
7.56	30.0	33.2	15.2	18.7	9.1	12.3
8.46	33.7	37.1	19.2	21.9	12.1	14.4

表 3 脉冲重复率为 10 kHz, 20 kHz, 30 kHz 时拉曼光脉冲宽度的实验值与理论值  
Table 3 Experimentally measured and theoretically calculated pulse width at 1176 nm for the pulse repetition rates of 10, 20, and 30 kHz

Pump power /W	Pulse width /ns					
	10 kHz		20 kHz		30 kHz	
	Experiment	Theory	Experiment	Theory	Experiment	Theory
4.14	14.4	9.4				
4.95	12.9	8.6	18.3	12.2		
5.85	11.0	7.8	13.8	11.1	16.8	12.8
6.75	9.0	7.2	11.9	10.0	15.8	12.2
7.56	9.1	6.7	10.1	9.2	11.4	11.3
8.46	8.5	6.4	9.4	8.3	11.6	10.5

## 4 结 论

对激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的自拉曼调 Q 激光器特性进行了详细研究,利用速率方程对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的自拉曼特性进行了理论分析,理论与实验大致相符。可见,使用速率方程能够大致地描述激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的自拉曼特性。

## 参 考 文 献

- Jia Fuqiang, Xue Qinghua, Zheng Quan *et al.*. All-solid-state 556-nm yellow laser by LBO intracavity-frequency-doubling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1017~1021  
贾富强,薛庆华,郑 权等. 全固态 LBO 腔内倍频 556 nm 黄光激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1017~1021
- Hou Xia, Chen Weibiao, Li Yongchun *et al.*. Experimental study for an arched diode-side-pumped Nd:YAG lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):623~628  
侯 霞,陈卫标,李永春等. 拱形激光二极管侧抽运 Nd:YAG 固体激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):623~628
- A. Agnesi, S. D. Acqua, E. Piccinini *et al.*. Efficient wavelength conversion with high-power passively Q-switched diode-pumped neodymium lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(8):1480~1484
- R. Fluck, B. Braun, E. Gini *et al.*. Passively Q-switched 1.34- $\mu$ m Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):991~993
- Z. Xiong, Z. G. Li, N. Moore *et al.*. Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(8):979~986
- Keming Du, Daijun Li, Hengli Zhang *et al.*. Electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with a high repetition rate and a short pulse width [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(2):87~89
- Zhiqiang Cai, Wuqi Wen, Yonggang Wang *et al.*. 5.3-W Nd:YVO<sub>4</sub> passively mode-locked laser by a novel semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):342~344
- A. A. Kaminskii, K. Ueda, H. J. Eichler *et al.*. Tetragonal vanadates YVO<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub>—new efficient  $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(1-3):201~206

- 9 Y. F. Chen. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser: influence of dopant concentration [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16):1915~1917
- 10 Y. F. Chen. Compact efficient all-solid-state eye-safe laser with self-frequency Raman conversion in a Nd:YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(18):2172~2174
- 11 Y. F. Chen. Efficient subnanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11):1251~1253
- 12 A. A. Demidovich, P. A. Apanasevich, L. E. Batay *et al.*. Sub-nanosecond microchip laser with intracavity Raman conversion [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(5):509~514
- 13 Weibiao Chen, Yuji Inagawa, T. Omatsu *et al.*. Diode-pumped self-stimulating, passively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:PbWO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(4-6):401~407
- 14 H. M. Pask. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Prog. in Quantum Electron.*, 2003, **27**(1):3~56
- 15 Xingyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang *et al.*. Modeling of diode-pumped actively Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(12):1912~1918

## 欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

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,请在《中国激光》、《光学学报》、《激光与光电子学进展》和 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,一年内有效。
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,说明您的意向。
- ② 来信至 [mail@opticsjournal.net](mailto: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](mailto:expert@mail.siom.ac.cn)

