

钇镱共掺光波导激光器的稳态特性

冷洁, 张晓霞, 王仕超, 周勇, 王祥斌, 陈沛然

(电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054)

摘要:从光波导激光器的工作理论出发,研究了钇镱共掺磷酸盐波导激光器的稳态特性。利用重叠因子简化了980 nm光抽运的钇镱共掺波导激光器四能级模型的速率-传输方程;在忽略自发辐射的情况下,利用数值模拟的方法,得到了钇镱共掺波导激光器的输出与 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 离子浓度、泵浦功率、波导长度等参量之间的关系曲线。理论分析结果表明,选择合适的钇镱离子浓度是制作钇镱共掺波导激光器的关键。采用980 nm波长的泵浦光,泵浦功率为80 mW, Er^{3+} 浓度取 $2.0 \times 10^{26}/\text{m}^3$ 左右, $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 浓度比为7~10,波导长度为2.0 cm左右时,可以得到最大输出光功率。

关键词:光波导激光器; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺;重叠因子;磷酸盐玻璃;稳态特性

中图分类号:TN248.4 文献标识码:A

Steady characteristics of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate optical waveguide laser

LENG Jie, ZHANG Xiao-xia, WANG Shi-chao, ZHOU Yong, WANG Xiang-bin, CHEN Pei-ran

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The characteristics of an $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass waveguide laser are investigated on the basis of the working theory of a waveguide laser. Using the overlapping factor, the rate-propagation equations of the four-level system of the phosphate glass waveguide laser are simplified. Without considering amplified spontaneous emission, the relations between the laser outputs and the laser parameters are researched by numerical simulations and the relation curves of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ ion concentration, pump powers and waveguide lengths with the laser powers are obtained. The result shows that selecting right $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ ion concentration is the key for the optical waveguide laser. The best fit results can be obtained from the following parameters in Er^{3+} ion concentration of $2.0 \times 10^{26}/\text{m}^3$, $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ concentration ratio of 7~10, and a waveguide length about 2.0 cm, when the pumping power is 80 mW at a wavelength of 980 nm.

Key words: optical waveguide laser; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doping; overlapping factor; phosphate glass; steady-state characteristics

1 引言

未来的通信将是全光通信已经成为人们的共识,与电通信的发展相似,光通信系统将向着小型化、集成化的方向发展,因此研究微型、可集成化的激光光源是十分必要的。对体积小、增益高的激光器,现在研究比较多的主要是掺稀土元素的激光玻璃为增益介质的光波导激光器。这种激光器最早用硅玻璃作基底,也有用硼酸盐玻璃、锗玻璃的,但后来发现磷酸盐玻璃更好。其主要优点有:在掺入 Yb 离子作敏化剂时,能量转移速率快,约是其它玻璃基质的 10 倍;发射截面相对较大,可储存较高的能量,易于实现粒子数反转。此外,它的物化性能也较高^[1]。

1972 年, Yajima H 和 Kawase S 等人第一次用溅射技术制作出了首例掺稀土的有源光波导(平面光波导器件)——掺钕激光器。1991 年,日本的 Kitagawa 等人首次在硅衬底上用火焰脱水沉积法制作出掺 Er^{3+} 平板波导激光器,同年 11 月份加拿大的 Honkanen 等人第一次报道了用银膜离子交换技术在共掺 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 的磷酸盐玻璃中制作出了单膜的沟道型波导。1992 年,南安普顿大学的 Fuchter T 等人用离子交换技术第一次制作出了掺 Er^{3+} 波导激光器。1997 年, Barbier D 等人又用离子交换技术在共 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 的磷酸盐玻璃中制作出了亚厘米长度的光波导激光器。2001 年,美国的 Callicoatt B E 等人第一次在商用的共掺 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 的磷酸盐玻璃中制作出了单频、锁模的波导激光器。2003 年, Sorbello G 等人制作出了基于扭转模技术的共掺 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 的磷酸盐玻璃的单频波导激光器^[2]。由于 Er^{3+} 具有丰富的能级,有多种波长的光跃迁,以 Yb^{3+} 作为敏化剂的掺 Er^{3+} 磷酸盐玻璃具有良好的光物理和光化学特性。以此为激光介质得到的 $1.54 \mu\text{m}$ 激光输出,与其它同波长激光器(如半导体激光器,灯泵 $\text{Er}:\text{YAG}$ 等激光器)相比,具有体积小、效率高、稳定性好、价格低等特点,可应用于光通信、激光测距等领域。为提高光学性能,对 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 磷酸盐玻璃的研究一直继续,包括寻求最佳掺杂浓度、抑制上转换发光和反向能量传递、减小自吸收、提

高热导率从而提高注入能量等等。

本文从光波导激光器的工作理论出发,建立了共掺 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 磷酸盐玻璃波导激光器的数学模型,对其稳定特性进行了计算和分析,讨论了泵浦功率、波导长度和掺杂浓度对输出光功率的影响。

2 钕镱共掺磷酸盐激光器的数值模型

2.1 钕镱共掺磷酸盐的能量传递系统

钕镱共掺磷酸盐的能量传递系统如图 1 所示,图中标明的数字代表活性离子的跃迁过程:(1)、(2)为 Yb^{3+} 离子的受激发射和受激吸收过程;(3)是 Yb^{3+} 离子的自发发射过程;(4)是 Yb^{3+} 离子到 Er^{3+} 离子的能量传递过程,处于激发态的一个 Yb^{3+} 离子将能量传递给一个处于基态的 Er^{3+} 离子后回到基态,而 Er^{3+} 离子获得能量到达激发态,其方程为: ${}^2F_{5/2}(\text{Yb}^{3+}) + {}^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+}) \longrightarrow {}^2F_{7/2}(\text{Yb}^{3+}) + {}^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+})$; (5)是 Er^{3+} 离子受激吸收到达 ${}^4I_{11/2}$ 的过程;(6)、(7)是 Er 基态和激光上能级的受激发射和受激吸收的过程;(8)是 Er 离子激光上能级自发发射的过程;(9)是两个处于激发态的 Er^{3+} 离子相互作用翻转的过程。在这个过程中两个处于激光上能级的 Er^{3+} 离子相互作用,一个离子将能量传递给另一个而到达基态,而另一个离子则获得能量跃迁到高的能态(${}^4I_{9/2}$),然后又快速弛豫到低能级^[3]。

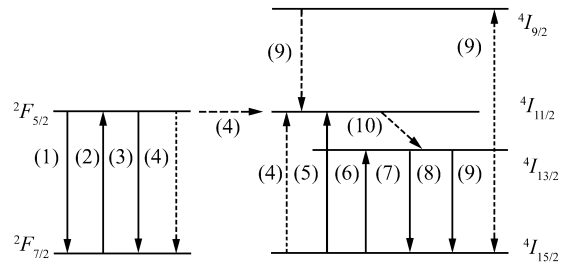


图 1 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光波导能级简图

Fig. 1 Energy level scheme of $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ codoped system

通过以上的过程分析可以得到下列一组速率方程^[4]:

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -W_{13}n_1 - W_{12}n_1 + W_{21}n_2 + C_{\text{up}}n_2^2 - C_{\text{cr}}n_1n_6, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = W_{12}n_1 - A_{12}n_2 - W_{21}n_2 + A_{32}n_3 - 2C_{\text{up}}n_2^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_3}{\partial t} = W_{13}n_1 - A_{32}n_3 + A_{43}n_4 + C_{\text{cr}}n_6, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_4}{\partial t} = C_{\text{up}}n_2^2 - A_{43}n_4, \quad (4)$$

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = N_{\text{Er}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial n_5}{\partial t} = -W_{56}n_5 + W_{65}n_6 + A_{65}n_6 + C_{\text{cr}}n_1n_6, \quad (6)$$

$$n_5 + n_6 = N_{\text{Yb}}, \quad (7)$$

式中 n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 分别为 Er^{3+} 能级 $^4I_{15/2}$ 、 $^4I_{13/2}$ 、 $^4I_{11/2}$ 、 $^4I_{9/2}$ 上的粒子数密度, n_5 和 n_6 分别为 Yb^{3+} 能级 $^2F_{7/2}$ 和 $^2F_{5/2}$ 上的粒子数密度, W_{12} 、 W_{21} 分别是信

号光受激吸收和发射几率, W_{13} 、 W_{56} 和 W_{65} 分别为泵浦光受激吸收和发射几率, C_{cr} 和 C_{up} 分别为 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 之间的交叉弛豫系数和上转换系数, N_{Er} 和 N_{Yb} 分别是 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的总的粒子数浓度。

当处于稳态时各式中对时间微分的项为零, 并且由于 $^4I_{9/2}$ 和 $^4I_{11/2}$ 能级上离子的寿命非常小, 近似认为 n_3 和 n_4 上的粒子数为零。速率方程简化为:

$$-W_{13}n_1 - W_{12}n_1 + W_{21}n_2 + A_{21}n_2 + C_{\text{up}}n_2^2 - C_{\text{cr}}n_1n_6 = 0, \quad (8)$$

$$n_1 + n_2 = N_{\text{Er}}, \quad (9)$$

$$-W_{56}n_5 + W_{65}n_6 + A_{65}n_6 + C_{\text{cr}}n_1n_6 = 0, \quad (10)$$

$$n_5 + n_6 = N_{\text{Yb}}, \quad (11)$$

激光器以单纵模运行时, 忽略放大自发辐射的影响, 则其抽运功率 $P_p(z, v_p)$ 和信号光功率 $P_s(z, v_s)$ 的传输方程可写为:

$$\frac{dP_p(z, v_p)}{dz} = -P_p(z, v_p) \int_A \Psi_p(x, y) \cdot [\sigma_{\text{ap}}n_1 + \sigma_{\text{ap}}^{\text{Yb}}n_5 - \sigma_{\text{ep}}^{\text{Yb}}n_6] dA - l_p P_p(z, v_p), \quad (12)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z, v_s)}{dz} = \pm P_s^\pm(z, v_s) \int_A \Psi_s(x, y) \cdot [\sigma_{\text{es}}n_2 - \sigma_{\text{as}}n_1] dA \mp l_s P_s^\pm(z, v_s), \quad (13)$$

其中 Ψ_p 和 Ψ_s 分别是泵浦光和信号光归一化的横向光场分布, A 是掺 Er^{3+} 光波导的导波区横截面积, σ_{ap} 为 Er^{3+} 泵浦光吸收截面, $\sigma_{\text{ap}}^{\text{Yb}}$ 、 $\sigma_{\text{ep}}^{\text{Yb}}$ 分别为 Yb^{3+} 泵浦光吸收和发射截面, σ_{as} 、 σ_{es} 则分别为信号光吸收和发射截面。

2.2 重叠积分法

重叠积分方法是一种有效的近似方法, 它不用计算波导中光场强度的横向分布。在波导中, 光强可写成横向场分布与纵向归一化强度变化的两个函数之积:

$$I_p = (x, y, z) = \Psi_p(x, y)I_p(z), \quad (14)$$

$$I_s = (x, y, z) = \Psi_s(x, y)I_s(z), \quad (15)$$

类似的, 粒子数分布也可以写成:

$$n_i(x, y, z) = f(x, y)n_i(z), \quad (16)$$

其中 $f(x, y)$ 是归一化的掺杂(横向)分布函数, n_i 为能级上的 Er^{3+} 数密度。

引入光波模场强度与 Er^{3+} 掺杂分布之间的重叠积分 Γ , 它与半导体激光器采用的限制因子类似, 其定义为:

$$\Gamma_{p,s} = \iint \Psi_{p,s}(x, y)f(x, y) dx dy, \quad (17)$$

积分区域为掺钇波导横截面。 $\Gamma_{p,s}$ 分别表示泵浦光和信号光光场强度的横向归一化分布与钇离子掺杂浓度横向归一化分布之间的重叠积分。

利用上面的关系式, 可将式(12)和式(13)化简为:

$$\frac{dP_p(z, v_p)}{dz} = -\Gamma_p P_p(z, v_p) [\sigma_{\text{ap}}n_1 + \sigma_{\text{ap}}^{\text{Yb}}n_5 - \sigma_{\text{ep}}^{\text{Yb}}n_6] - l_p P_p(z, v_p), \quad (18)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z, v_s)}{dz} = \pm \Gamma_s P_s^\pm(z, v_s) [\sigma_{\text{es}}n_2 - \sigma_{\text{as}}n_1] \mp l_s P_s^\pm(z, v_s), \quad (19)$$

这样即将传输方程转为常微分方程。

2.3 数值计算

将边界条件代入速率方程组,得到初始的 Er^{3+} , Yb^{3+} 离子浓度,然后将得到的 Er^{3+} , Yb^{3+} 浓度代入传输方程 (18) 和 (19),利用龙格-库塔 (Runge-Kutta) 法,求得下一步的泵浦光和信号光

的功率 $P_p(z, v_p)$, $P_s(z, v_s)$;再将 $P_p(z, v_p)$, $P_s(z, v_s)$ 代入速率方程组,循环迭代求解,即可得到每一步的泵浦光和信号光功率,最终求得泵浦光和信号光的输出功率。数值计算所用的参数如表 1 所示^[5],取重叠积分 $\Gamma_s = \Gamma_p = 0.6$ 。

表 1 钇镱共掺光波导激光器的参数

Tab. 1 Best-Fit Parameters

激光器参数		
Er^{3+} 泵浦光吸收截面	σ_{ap}	$2.58 \times 10^{-25} m^2$
Er^{3+} 信号光吸收截面	σ_{as}	$6.5 \times 10^{-25} m^2$
Er^{3+} 信号光发射截面	σ_{es}	$9.0 \times 10^{-25} m^2$
上转换系数	C_{up}	$5.0 \times 10^{-23}/m^3$
Er^{3+} , Yb^{3+} 之间的交叉弛豫系数	C_{cr}	$2.0 \times 10^{-22} m^3/s$
Yb^{3+} 泵浦光吸收截面	σ_{ap}^{Yb}	$1.0 \times 10^{-24} m^2$
Yb^{3+} 泵浦光发射截面	σ_{ep}^{Yb}	$1.0 \times 10^{-24} m^2$

3 数值计算结果及分析

利用数值模拟的方法,研究了钇镱共掺波导激光器的输出与 Er^{3+}/Yb^{3+} 离子浓度、泵浦功率、波导长度等参数的关系。

图 2 为激光器泵浦功率与输出功率的关系。曲线 A、B、C 分别取 $Er^{3+} : 1.5 \times 10^{26}/m^3$, $Yb^{3+} : 1.5 \times 10^{27}/m^3$; $Er^{3+} : 2.0 \times 10^{26}/m^3$, $Yb^{3+} : 2.0 \times$

$10^{27}/m^3$ 和 $Er^{3+} : 2.5 \times 10^{26}/m^3$, $Yb^{3+} : 2.5 \times 10^{27}/m^3$ 。可以看到,随着泵浦光的增加,输出光也逐渐增加并逐渐减缓,这是因为随着掺杂离子浓度变高,越来越多的粒子被激发到高能级,到达一定程度后,由于能量上转换和激发态吸收的存在,且都显著增强,使得反转粒子数反而减少,从而导致了输出光能量随着泵浦光的增加逐渐变得缓慢增加。如图 3 所示,曲线 A、B、C 表示泵浦功率分别取 100 mW、80 mW 和 60 mW 时波导长度与输出功率的关系。当波导的长度较长时,激光

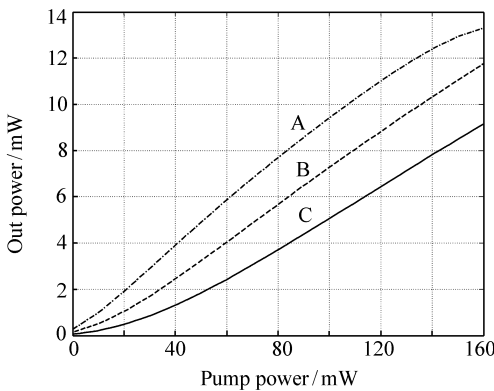


图 2 泵浦功率与输出功率关系图

Fig. 2 Relation between pumping power and output power

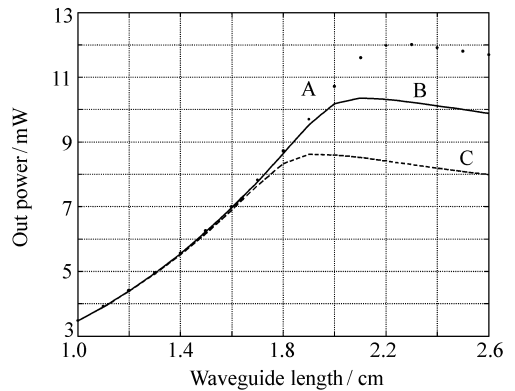


图 3 波导长度与输出功率关系图

Fig. 3 Relation between waveguide length and output power

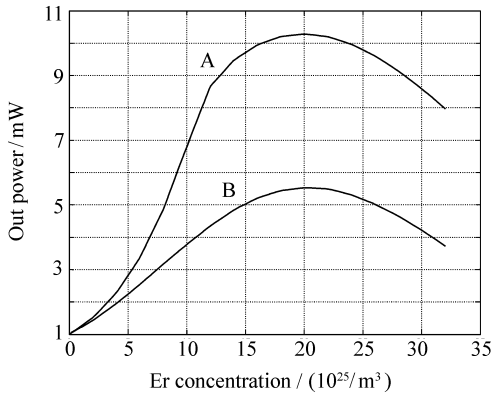


图4 掺镱离子前后输出功率与掺铒浓度的变化关系

Fig. 4 Relation between output power and concentration of Er^{3+}

器内信号光功率呈下降趋势,这是因为随着泵浦光的被吸收,其光功率变小,造成处于激光上能级的反转粒子数减少,信号光的增益变小;当波导超过某长度时,增益将会小于损耗从而造成信号光功率变低,输出功率反而降低。图4曲线A显示

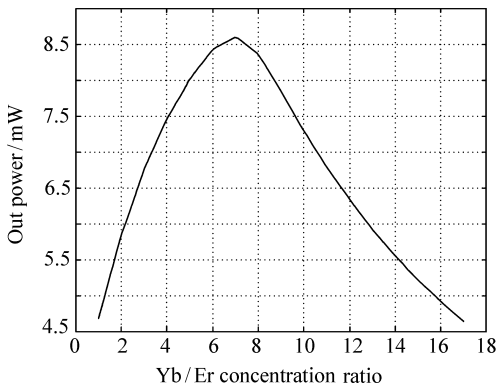


图5 Yb/Er 浓度比与输出功率的关系图

Fig. 5 Concentration ratio of Yb/Er and output power

镱掺杂之后,增益大大提高了,这与前面分析的镱掺杂有助于提高泵浦效率,提高粒子数反转度,使增益增大的结论是一致的;图中曲线B为未掺杂镱,此时可以看到上转换的作用。图5表示 $\text{Yb}^{3+} - \text{Er}^{3+}$ 之间必须有一个最佳的掺杂浓度比,使 Yb^{3+} 能均匀地包围 Er^{3+} 形成 $\text{Yb}^{3+} - \text{Er}^{3+}$ 离子对,这样 Yb^{3+} 能够把泵浦吸收到的能量通过离子对充分高效地转移给 Er^{3+} ,使 Er^{3+} 达到粒子数反转,若 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 过低,则 Yb^{3+} 泵浦吸收效率不高, Er^{3+} 会形成离子簇,引起浓度猝灭。若 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 过高,则会形成 Yb^{3+} 离子簇互相之间的能量转移,导致泵浦功率的吸收效率下降,过多的 Yb^{3+} 还会引起散射损耗。因此,要获得高增益的功率输出就需要合适的 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 浓度掺杂比。

4 结论

从光波导激光器的工作理论出发,在忽略自发辐射放大情况下,通过求解速率方程和传输方程,建立了共掺 $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ 磷酸盐玻璃波导激光器的数学模型,对 $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光波导激光器的稳态特性进行了计算和分析。详细讨论了泵浦光功率、波导长度以及 $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ 掺杂浓度对输出光功率的影响。

用重叠积分法对 $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光波导激光器的速率方程和传输方程进行研究。数值计算结果表明,取 980 nm 波长的泵浦光,泵浦功率为 80 mW 时, Er^{3+} 离子的浓度取 $2.0 \times 10^{26} / \text{m}^3$ 左右较好,而 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 浓度的比率应取 7 ~ 10,在波导长度为 2 ~ 2.4 cm 时可以得到最大的输出光功率。在理论分析的基础上给出了 $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光波导激光器的优化设计。

参考文献:

- [1] ONDRÁČEK F, JÁGERSKÁ J, SALAVCOVÁ L, *et al.*. Er-Yb waveguide amplifiers in novel silicate glasses[J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 2008, 44(6): 536-541.
- [2] 王洁红, 慕桓, 全国良, 等. 掺铒磷酸盐玻璃波导放大器的特性研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(1): 99-104. WANG J H, MU H, JIN G L, *et al.*. Characteristic of Er-doped phosphate glass waveguide amplifier[J]. *Acat Opt. Sinica*, 2005, 25(1): 99-104. (in Chinese)
- [3] SORBELLO G, TACCHEO S. Twisted-mode single-frequency Er-Yb waveguide laser at 1.5 μm [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2003, 35: 669-674.
- [4] VALLÉS J A, REBOLLEDO M A, CORTÉS J. Full characterization of packaged Er Yb-codoped phosphate glass

waveguides[J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 2006, 42(2):152-159.

- [5] STROHHOFER G, POLMAN A. Absorption and emission spectroscopy in Er^{3+} - Yb^{3+} doped aluminum oxide waveguides [J]. *Opt. Mater.*, 2003, 21:705-708.
- [6] DIPAS F, FARALLI Q. Er/Yb codoped silica waveguide amplifiers longitudinally pumped by broad-area lasers[J]. *Photonics Technol. Lett.*, 2007, 19(24):1967-1969.
- [7] ZHANG D L, WANG D CH. Numerical analysis of optical amplification in Er/Yb codoped Ti:LiNbO_3 strip waveguides [J]. *J. Quant. Elect.*, 2006, 41(7):958-969.

作者简介:冷洁(1983—),男,四川成都人,硕士,研究方向为波导激光器。E-mail:6832806@qq.com

《光机电信息》征稿启事

本刊由中国光学学会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。

本刊征集光学和应用光学、光电子学和激光、微纳科技、材料科学、电磁学和电子学、机械、信息科学和技术等大领域如下形式的文章:

1. 研究信息快报

本栏目主要报道最新研究成果、阶段新结果、片段新结果的介绍或说明,不要求是纯学术论文。目的是为那些尚未能形成正式研究论文,但希望把已有的最新研究成果、阶段或片段新结果抢先发表的科研工作者提供一个平台,保护广大科研人员的知识产权。主要内容包括研究背景简介、研究过程或实验过程简述、观察到的结果、数据及相关信息说明、评论等,附图表数据等,也可附参考文献(一般不要求)。本栏目发表的论文数据不影响在正式发表论文时使用。

本栏目出版周期:收稿日期为每月5日之后、25日之前收到,下月即出版发表。如为当月5号之前收到,当月发表。

2. 研究快报

本栏目主要征集研究新成果的快速报道,要求同其他刊物的研究快报。要求具有如下内容:摘要、关键词、研究背景(引言)、研究过程或实验过程、研究结果、参考文献。

3. 研究评论

主要是对当前最新研究结果或研究动态的评论或展望,也可是基于他人研究结果的二次开发或更深层次的研究结果报道。

4. 综述文章

(1)综述本领域或本学科的研究成果和进展、发展动态和趋势。(2)作者本研究群体的研究工作综述。

5. 研究论文

征集研究新结果的学术论文。

6. 应用开发类论文

接受各类大学、研究所、企业自主研发的新产品性能报道和新应用报道;新型器件在系统应用结果方面的报道等。是反映企业研发创新和对自身产品的再认识的能力、并能够让用户更好地了解产品性能、拓展应用范围的手段。本栏目论文具有产品推广广告作用。

7. 成果信息和研发信息

本栏目主要为大学、研究所等研发部门发布研究成果信息或项目工程研发信息;企业需要开发或攻关的项目信息等。目的是为研发部门和企业之间架起沟通桥梁。

8. 各类形式的企业宣传、广告,具体来电来函商谈,本刊做各类宣传、广告,费用低廉。

“好酒也怕巷子深”——您的产品多一份广告就会多一份收益,低廉的费用可以节约一个推销员的出差费用,而收费比高,广告范围广。

在我们这里刊登的广告哪怕只为您带来一个客户——您就收回了广告成本,同时也给您带来了久远的影响和效益。纸版的广告+电子版的广告——更值得客户信赖,更能为您培养潜在的中、远期客户。

网上投稿: E-mail: gjdxw@gmail.com; xxfw@ciomp.ac.cn

挂号邮寄: 邮编: 130033

地址: 长春市东南湖大路3888号《光机电信息》编辑部

电话: 0431-86176853

《光机电信息》编辑部