

文章编号: 0258-7025(2008)08-1144-05

大功率 InGaAsP/GaAs 量子阱半导体激光器的 直流和 $1/f$ 噪声性质

张 爽¹ 郭树旭¹ 郜峰利¹ 郭 欣² 曹军胜¹ 于思瑶¹

(¹ 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012)
(² 吉林大学物理科学学院, 吉林 长春 130026)

摘要 对大功率 InGaAsP/GaAs 量子阱(QW)半导体激光器(LD)的直流(DC)特性和小注入下的低频噪声(LFN)特性进行了实验研究。DC 检测发现, $V-I$ 和 $IdV/dI-I$ 可以对 LD 的电流泄漏作出判断。LFN 检测发现, 小注入下的 $1/f$ 低频电压噪声幅值 $B_V(I) \propto I^{\beta_V}$ 。理论分析和老化实验均表明, 电流指数 β_V 与载流子输运和电流泄漏机制之间有很好的相关性, 存在电流泄漏和无辐射复合的器件其 $|\beta_V|$ 较小, 可靠性较差。

关键词 激光器; 半导体激光器; 可靠性; $1/f$ 噪声; 直流特性; 电流泄漏

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1144

Direct Current and $1/f$ Noise Characteristics of InGaAsP/GaAs High Power Quantum Well Laser Diodes

Zhang Shuang¹ Guo Shuxu¹ Gao Fengli Guo Xin² Cao Junsheng¹ Yu Siyao¹

(¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China
² College of Physical Science, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China)

Abstract The direct current (DC) and $1/f$ noise property at low bias current and low frequency were investigated on the high power InGaAsP/GaAs quantum well (QW) laser diodes. By using DC test, we found that $V-I$ and $IdV/dI-I$ are indicators of current leakage. By using low frequency noise (LFN) test, we found that voltage noise amplitude $B_V \propto I^{\beta_V}$. Theoretical analysis and aging tests indicate that current index β_V is correlated with the carrier transport and current leakage mechanisms. The small $|\beta_V|$ indicates that the lasers are unreliability devices with serious current leakage and non-radiative recombination.

Key words lasers; semiconductor lasers; reliability; $1/f$ noise; direct current characteristics; current leakage

1 引 言

大功率半导体激光器(LD)广泛应用于工业、医疗、军事和通信等领域,它的工作电流大、电流密度高、功率损耗大,且价格昂贵,所以对其可靠性的研究显得尤为重要。传统的电老化方法虽然有效,但对器件会造成一定损伤,且大批量老化受到大功率驱动电源这一瓶颈的限制^[1]。 $V-I$ 检测是一种常用

的无损检测方法,但它所能提供的信息是有限的,而电导数 $IdV/dI-I$ 检测方法对 $V-I$ 特性敏感且可对电流泄漏作出表征,目前已得到广泛而深入的研究^[2~7]。噪声检测方法因其对器件失效机制更敏感,目前正成为半导体器件可靠性评价的研究热点^[8~12]。以往文献大多倾向于单纯的直流^[2~7]或噪声^[8]规律的研究,虽有一些文献对 $V-I$ 与噪声之

收稿日期:2007-09-29; 收到修改稿日期:2008-01-10

基金项目:国家自然科学基金(60471009)和吉林省重大科技发展计划(200403001-4)资助项目。

作者简介:张 爽(1967—),男,辽宁人,副教授,目前主要从事半导体激光器可靠性方面的研究。

E-mail: zhangshuang@jlu.edu.cn

导师简介:郭树旭(1959—),男,甘肃人,教授,博士生导师,目前主要从事弱信号检测和图像处理等方面的研究。

E-mail: guosx@mail.jlu.edu.cn

间的关系作了相关报道^[9~11], 而关于 $I_dV/dI-I$ 与噪声之间关系的文献甚少^[12]。针对直流与噪声特性相关性的研究对深刻认识 LD 直流和噪声的本质, 以便更好地利用两种无损检测方法全面、准确地进行可靠性评价意义重大; 同时, 对低噪声器件的研制也有积极意义^[13,14]。本文对电导数和噪声特性进行了对比研究, 发现两者之间具有很好的相关性。

通过 DC($V-I$ 和 $I_dV/dI-I$) 检测发现, 根据直流性质的差异可将器件分成两类: 一类存在较大的泄漏电流(典型器件 62[#]), 另一类存在很小的泄漏电流(典型器件 59[#])。对这两类大功率 InGaAsP/GaAs QW LD 的 LFN 在小注入下(1 mA 左右)进行了测量, 测量结果显示 $B_V(I) \propto I^{\beta_V}$, 且存在电流泄漏的器件, 其 $1/f$ 电压噪声的幅值随电流减小得较慢, 即 $|\beta_V|$ 较小的器件其潜在的无辐射复合和电流泄漏较严重。进一步的恒流老化实验证实, $|\beta_V|$ 小的器件其寿命相对较短。

2 结果与分析

2.1 直流特性测量

$V-I$, $I_dV/dI-I$ 和 $P-I$ 测量系统由微机(PC), PCI-NI6014 数据采集卡, 光电转换, 放大电路和驱动电源组成, 通过基于 Measurement Studio 的 VC++ .Net 编程完成自动测量和参数提取, 测试系统如图 1 所示。

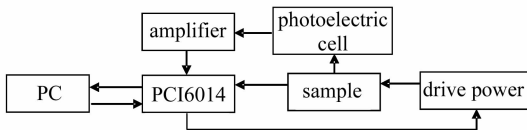


图 1 $V-I$, $I_dV/dI-I$ 和 $P-I$ 自动测量系统

Fig. 1 Automatic measurement system of $V-I$, $I_dV/dI-I$ and $P-I$

两只典型大功率 ($P_{\max} = 2$ W) InGaAsP/GaAs 量子阱半导体激光器(62[#], 59[#])的 $V-I$ 测量结果如图 2 所示。由图 2 可见 62[#] 与 59[#] 的 $V-I$ 特性明显不同, 即 62[#] 的电压饱和和特性较差, 微分电阻较小。为进一步定量给出两只器件 $V-I$ 特性的差异, PC 机由实测 $V-I$ 数据得到的 62[#] 和 59[#] 的 $I_dV/dI-I$ 和 $P-I$ 曲线如图 3 和图 4 所示, 其中光功率没有定标, 但可以表示相对大小关系。

由图 3 和图 4 可见, 62[#] 的阈值电流较大 ($I_{th} = 385.2$ mA), 外量子效率较低, 实测理想因子较大 ($m = 1.58$), 等效串联电阻较小(阈值前 $R_{s1} = 0.17 \Omega$, 阈值后 $R_{s2} = 0.18 \Omega$)。实验结果与文献[2]

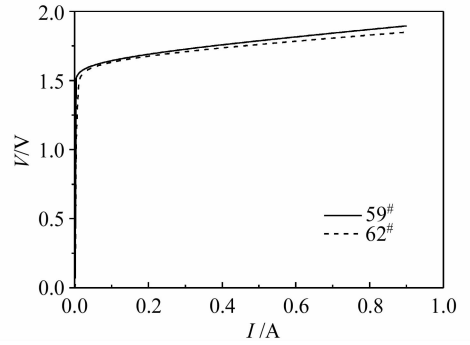


图 2 实测 62[#] 和 59[#] 的 $V-I$ 曲线

Fig. 2 Measured $V-I$ curves of samples 62[#] and 59[#]

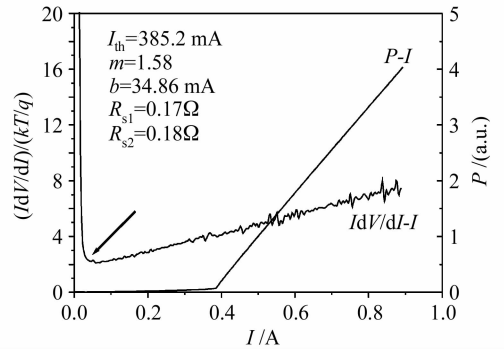


图 3 实测 62[#] 的 $I_dV/dI-I$ 和 $P-I$ 曲线

Fig. 3 Measured $I_dV/dI-I$ and $P-I$ curves of sample 62[#]

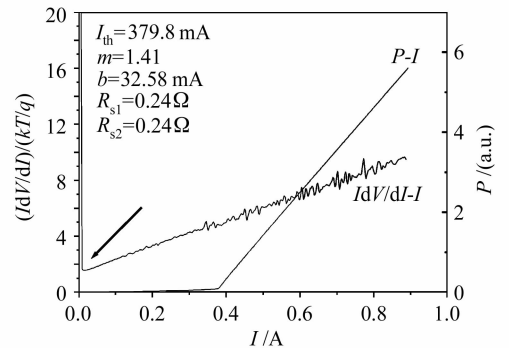


图 4 实测 59[#] 的 $I_dV/dI-I$ 和 $P-I$ 曲线

Fig. 4 Measured $I_dV/dI-I$ and $P-I$ curves of sample 59[#]

报道的电流泄漏导致阈值电流增大, 外量子效率降低, 实测理想因子变大^[2]的结论吻合, 而阈值后截距 b 没有太大的差别^[3], 并联泄漏电阻的存在必然导致等效串联电阻的减小。因此推测 62[#] 存在较大的电流泄漏, 泄漏的另一个特征是图中箭头所指的拐点位置明显右移和上移, 实验发现 $V-I$ 饱和和特性差的器件其 I_dV/dI 均有该特征, 这一特征会导致实测理想因子(即非本征理想因子^[4])变大。

2.2 噪声特性测量

为进一步研究电流泄漏的微观机制, 对器件的低频(1.25 Hz~1 kHz)电压噪声 S_V 在毫安附近进

行了测量,测量系统如图 5 所示。样品和低噪声前置放大器均采用电池供电以减小噪声干扰,前置放大器为 EG&G PARC 5184, 频谱仪为 ADVANTEST R9211C。

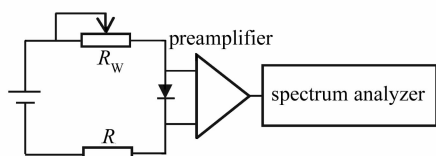


图 5 噪声测量系统

Fig. 5 Noise measurement system

理论上电压噪声功率谱密度可表示为

$$S_V = A + \frac{B_V}{f^\gamma} + \frac{C}{1 + (f/f_0)^2}, \quad (1)$$

式中 A 为白噪声幅值, B_V 为 $1/f^\gamma$ 噪声幅值, C 和 f_0 分别为 $g-r$ 噪声的幅值和特征频率, 各噪声分量可反映不同的微观机制。根据(1)式可将 $1/f^\gamma$ 噪声的幅值 B_V 和频率指数 γ 提取出来, 典型器件 62[#] 和 59[#] 的 B_V-I 曲线如图 6(a), (b) 所示。测量结果显示 B_V 与 I 呈指数规律变化 ($B_V \propto I^{\beta_V}$), 其中 β_V 为电压噪声的电流指数。实测 62[#] 的 $\beta_V = -0.75$, 而 59[#] 的 $\beta_V = -3.38$, 即 62[#] 的 $1/f$ 电压噪声幅值随电流的降落较 59[#] 缓慢得多。图中 γ 值为不同电流下测得的平均值, γ 值显示这两只激光器的电压噪声均呈现近似纯 $1/f$ 噪声性质。

上述实验结果与文献[8,9]中小注入下 $S_V \propto$

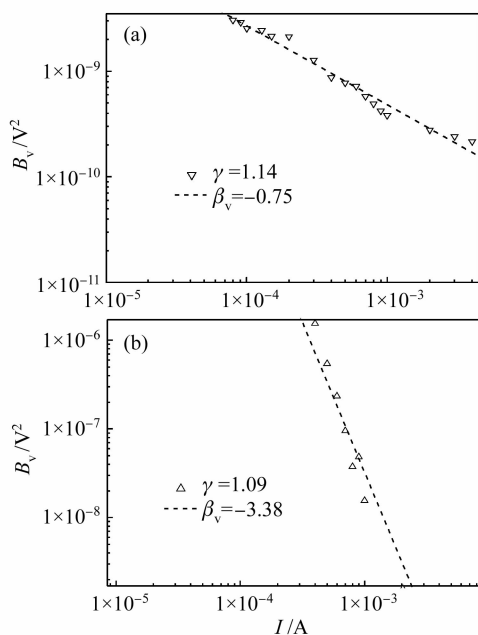


图 6 $1/f$ 噪声随偏置电流的变化

Fig. 6 Measured amplitudes of $1/f$ noise versus various bias currents. (a) 62[#]; (b) 59[#]

I^{-1} ($\beta_V = -1$) 的实验结果不符。根据电压噪声与电流噪声的关系

$$S_V = \left(\frac{dV}{dI}\right)^2 S_I, \quad (2)$$

若考虑该电流测量范围内满足 $R_s \ll mkT/qI \ll R_p$, 其中 R_s 为半导体激光器的等效串联电阻, R_p 为等效并联泄漏电阻, mkT/qI 为 p-n 结的非线性电阻, 故有 $dV/dI = mkT/qI$, $(dV/dI)^2 \propto I^{-2}$ 。根据噪声理论, 对于扩散 $1/f$ 噪声满足 $S_I \propto I^1$, 对于复合 $1/f$ 噪声 $S_I \propto I^2$ 。因此对于复合 $1/f$ 噪声应有 S_V 随 I 变化较弱 ($S_V \propto I^0$), 而对于扩散 $1/f$ 噪声应有 S_V 随 I 变化较强 ($S_V \propto I^{-1}$)。文献[8,9]的结果与小注入下为扩散 $1/f$ 噪声的 $S_V \propto I^{-1}$ 的理论分析一致。关于大功率 InGaAsP/GaAs 量子阱半导体激光器的实验结果显示, 不同器件的 β_V 在 $-4.5 \sim -0.3$ 宽范围内变化, 这与上述理论分析有较大出入, 对于这一问题本文做如下解释。

根据(2)式, S_V 的测量结果与电流噪声 S_I 和微分电阻 dV/dI 有关。其中 $(dV/dI)^2$ 项对 S_V 的影响较大。通常的分析是将 p-n 结的非线性电阻近似看成 mkT/qI [8,9], 即 $(dV/dI)^2 \propto I^{-2}$, 实际上不同器件满足这一关系的电流区间是不同的。如图 3 和图 4 所示的电导数 $IdV/dI-I$ 曲线, 只有在箭头所指的拐点的右侧才满足 $dV/dI = mkT/qI$ 这一关系, 而此时的电流将达到十几或几十毫安以上, 根据文献[4]的观点, 大功率器件可以看成小功率器件的并联结构, 而这一并联结构必然导致在更大的电流下才满足 $dV/dI = mkT/qI$ 这一近似关系。测量的电流范围是在毫安量级以下, 即图 3 和图 4 箭头所示位置的左侧, 此时 p-n 结的微分电阻 R_{p-n} 可由 dV_1/dI_1 (V_1 和 I_1 分别为 p-n 结两端电压和流经的电流)求得

$$I_1 = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_1}{mkT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

如果考虑并联线性泄漏电阻 R_p , 则器件总的微分电阻应为

$$\frac{dV}{dI} = [(R_{p-n} + R_s)^{-1} + R_p^{-1}]^{-1}, \quad (4)$$

满足(3)和(4)式, 且考虑小注入(毫安以下)和 R_p 的影响时, $dV/dI = mkT/qI$ 这一近似关系不成立。由(3)和(4)式容易得到在小注入和考虑 R_p 的影响时 dV/dI 随 I 的降落比 I^{-1} 快, 图 3 和图 4 箭头所指位置左侧的 $IdV/dI-I$ 曲线随 I 呈降落趋势也证实了这一点。对比图 3 和图 4 发现, 图 3 的 $IdV/dI-I$ 较图

4 降落慢,这根据(4)式可解释为 $62^\#$ 的 R_p 较小,即线性泄漏较严重。根据(4)式, R_p 对 dV/dI 的影响是相当大的,进一步会对 S_V 的测量结果产生较大影响,这一问题导致 β_V 在较大范围内变化的主要原因之一。根据分析,小注入时 dV/dI 随 I 的降落远比 I^{-1} 快(尤其在 R_p 大的情况),即 $(dV/dI)^2$ 随 I 的降落远比 I^{-2} 快,对于扩散 $1/f$ 噪声满足 $S_I \propto I$,故 S_V 随 I 降落较快;反之,若 R_p 小,则 dV/dI 随 I 降落减缓,又对于复合 $1/f$ 噪声 $S_I \propto I^2$,故 S_V 随 I 降落较慢。

为了进一步验证 $62^\#$ 和 $59^\#$ 的可靠性,对这两只器件进行恒流老化实验,老化时间共 600 h(每天老化 10 h),0~100 h,老化电流 $I = 600$ mA;100~200 h, $I = 700$ mA;200~300 h, $I = 800$ mA;300~600 h, $I = 900$ mA。老化 600 h 后的 $I dV/dI-I$ 和 $P-I$ 曲线如图 7 和图 8 所示。

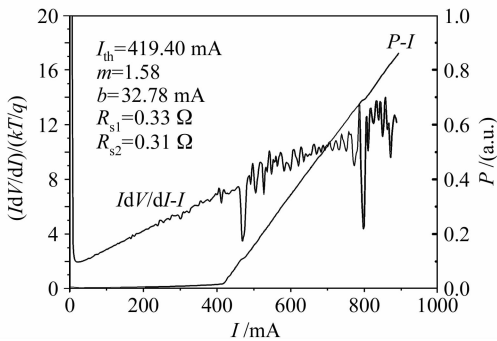


图 7 老化 600 h 后 $62^\#$ 的 $I dV/dI-I$ 和 $P-I$ 曲线
Fig. 7 $I dV/dI-I$ and $P-I$ curves of sample $62^\#$ after aging 600 h

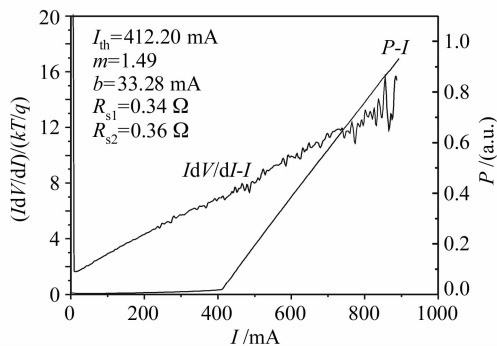


图 8 老化 600 h 后 $59^\#$ 的 $I dV/dI-I$ 和 $P-I$ 曲线
Fig. 8 $I dV/dI-I$ and $P-I$ curves of sample $59^\#$ after aging 600 h

由图 7 和图 8 可见, $62^\#$ 较 $59^\#$ 可靠性降级速度快,表现在 $I dV/dI-I$ 曲线起伏较大^[5],光功率产生明显折扭。按照分析,由于 $62^\#$ 存在较多的由于缺陷形成的非辐射复合中心,或是存在较严重的电流泄漏,从而对器件寿命产生一定影响。为进一步验证

$|\beta_V|$ 与器件可靠性之间的关系,本文对 $62^\#$ 和 $59^\#$ 电压噪声的电流指数 β_V 的老化规律进行了统计分析,如表 1 所示。

表 1 $1/f$ 电压噪声的电流指数随老化时间的变化
Table 1 Current index of $1/f$ voltage noise versus aging time

Aging time / h	Current index (β_V)	
	$59^\#$	$62^\#$
0	-3.38	-0.75
100	-3.43	-0.66
200	-3.39	-0.61
300	-2.51	-0.62
400	-1.91	-0.66
500	-2.00	-0.59
600	-1.81	-0.62

由表 1 可见, $62^\#$ 和 $59^\#$ 的电流指数 β_V 的绝对值 $|\beta_V|$ 随老化时间的增加呈减小趋势,根据理论分析,是由于电流泄漏或无辐射复合的加剧导致的。另外,对于正常使用中逐渐老化的器件也观察到上述规律,例如 NL1W40 在使用前 $\beta_V = -2.31$,经使用半年后 $\beta_V = -0.84$ 。因此, $|\beta_V|$ 小的器件应存在较严重的无辐射复合或电流泄漏,可靠性较差。

3 结论

通过对大功率 InGaAsP/GaAs 量子阱半导体激光器的直流特性和小注入下低频 $1/f$ 电噪声特性的综合研究,揭示了 DC($V-I$ 和 $I dV/dI$) 检测和 $1/f$ 噪声检测(β_V 检测)反映电流泄漏的共同物理基础。理论和实验表明,存在无辐射复合和电流泄漏的器件其 $1/f$ 电压噪声幅值随电流降落较慢($|\beta_V|$ 较小),反之则 $1/f$ 电压噪声幅值降落较快($|\beta_V|$ 较大)。 $|\beta_V|$ 小的器件缺陷密度较大、无辐射复合电流较大、电流泄漏较大,因此可靠性差。虽然这一检测方法的实际应用仍需通过大量老化实验来验证,但在可靠性理论研究方面还是可以提供很好的参考和借鉴。

参 考 文 献

- Gao Songxin, Wu Deyong, Wei Bin et al.. Reliability of high power diode laser stack [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (Suppl.): 6~9
高松信,武德勇,魏彬等. 高功率二极管激光器阵列可靠性研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊): 6~9
- P. D. Wright, W. B. Joyce, D. C. Craft. Electrical derivative characteristics of InGaAsP buried heterostructure lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(3): 1364~1372
- M. M. Choy, C. E. Barnes. Effective screen for fast aging InGaAsP BH lasers using electrical derivatives [J]. *Electron.*

- Lett.*, 1985, **21**(19):846~848
- 4 Zhang Shuang, Guo Shuxu, Guo Xin *et al.*. Extrinsic ideality factor of laser array [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, **28**(5):768~773
张爽,郭树旭,郭欣等. 激光器阵列的非本征理想因子[J]. 半导体学报, 2007, **28**(5):768~773
 - 5 Qi Liyun, Shi Jiawei, Li Hongyan *et al.*. The peak in the electric derivative curves and optic derivative curves of GaAs/GaAlAs high-power QW lasers [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2000, **40**:2123~2128
 - 6 Li Hongyan, Shi Jiawei, Jin Enshun *et al.*. An application of the electrical derivative measurement in rapid screening of high-power semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6):507~510
李红岩,石家纬,金恩顺等. 电导数测试用于大功率半导体激光器的快速筛选[J]. 中国激光, 1999, **A26**(6):507~510
 - 7 Lin Hu, Guo Shuxu, Zhao Wei *et al.*. Wavelet transform for evaluation of semiconductor laser reliability [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1050~1054
林虎,郭树旭,赵蔚等. 小波变换用于半导体激光器可靠性分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(9):1050~1054
 - 8 Bao Junlin, Zhuang Yiqi, Du Lei *et al.*. A unified model for $1/f$ noise in n-channel and p-channel MOSFETs [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(5):2118~2122
包军林,庄奕琪,杜磊等. n/p 沟道 MOSFET $1/f$ 噪声的统一模型[J]. 物理学报, 2005, **54**(5):2118~2122
 - 9 Hu Jin, Du Lei, Zhuang Yiqi *et al.*. Noise as a representation for reliability of light emitting diode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3):1384~1389
胡瑾,杜磊,庄奕琪等. 发光二极管可靠性的噪声表征[J]. 物理学报, 2006, **55**(3):1384~1389
 - 10 X. Y. Chen, A. Pedersen, O. G. Hellesø *et al.*. Electrical noise of laser diodes measured over a wide range of bias currents [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2000, **40**:1925~1928
 - 11 R. Crook, B. K. Jones. Noise and DC characteristics of power silicon diodes [J]. *Microelectron. Reliab.*, 1997, **37**(10/11):1635~1638
 - 12 Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Shumei *et al.*. The correlation between the low-frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and devices surface non-radiative current [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2002, **42**:153~156
 - 13 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):438~442
吕彦飞,檀慧明,钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(4):438~442
 - 14 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):217~220
俞本立,甄胜来,朱军等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(2):217~220

《中国激光》“激光加工”专题征稿启事

激光加工技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于 2008 年 11 月正刊上推出“激光加工”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧蚀与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

截稿日期:2008 年 9 月 15 日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:mayi@siom.ac.cn(主题标明“激光加工”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请发邮件至 mayi@siom.ac.cn 询问。

《中国激光》编辑部