

文章编号: 1007-6654(2004)02-0087-06 ****

LD 双端端面泵浦的高功率连续单频 Nd:YVO₄ 激光器

赵晶云, 张宽收[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 研制了高功率连续单频 Nd:YVO₄ 激光器。在考虑激光晶体因吸收泵浦光而产生的热透镜效应的基础上, 设计了六镜环行激光谐振腔, 采用两个光纤耦合输出的高功率激光二极管双端端面泵浦结构, 在总泵浦功率为 32.3 W 的情况下, 得到 10.4 W 的单频 1.064 μm 红外输出, 斜效率为 43.7%, 长期功率稳定性优于 1%(4 h), 激光器自由运转时的频率漂移小于 150 MHz(1 min)。

关键词: 高功率; 单频激光; 双端端面泵浦

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 引言

激光二极管泵浦的固体激光器具有全固态、小型化、效率高、使用方便等优点而受到大家的广泛关注, 尤其是实现单频运转的全固态激光器以其优良的频率特性和输出功率稳定性可广泛应用在相干信息处理、频率计量、量子光学、引力波测量和量子信息等研究领域。在高功率全固态单频连续激光器研究方面, 国外相干公司已有 10 W 全固态单频绿光激光器商业化产品, 国内山西大学光电研究所进行了一系列研究工作, 并有 300 mW 全固态单频绿光激光器商业化产品, 并有瓦级全固态单频绿光和红外激光器的研制报道^[1,2]。出于技术发展及研究工作的需求, 我们在原有工作的基础上, 开展了高功率全固态连续单频激光器的研制。

在本文中, 我们报道了研制高功率连续单频

Nd:YVO₄ 激光器的实验结果。我们在考虑在高功率泵浦条件下激光晶体因吸收泵浦光而产生的热透镜效应的基础上, 设计了六镜环行激光谐振腔, 采用两个光纤耦合输出的高功率激光二极管双端端面泵浦结构, 在总泵浦功率为 32.3 W 的情况下, 得到 10.4 W 的单频 1.064 μm 红外输出, 斜效率为 43.7%, 长期功率稳定性优于 1%(4 h), 激光器自由运转时的频率漂移小于 150 MHz(1 min)。

1 实验装置及腔型设计

LD 双端端面泵浦的高功率连续单频 Nd:YVO₄ 激光器的实验装置如图 1 所示。

泵浦源是两个由光纤耦合输出的最大功率为 25 W 的半导体激光器(美国 Coherent 公司生产的 FAPTM系统), 光纤芯径为 800 μm, 数值孔径为

* 收稿日期: 2004-05-17

基金项目: 山西省青年科学基金和回国留学人员基金项目

作者简介: 赵晶云(1980), 女, 山西晋城人, 山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室在读硕士。研究方向: 激光技术。

[†] 通讯联系人: kuanshou@sxu.edu.cn

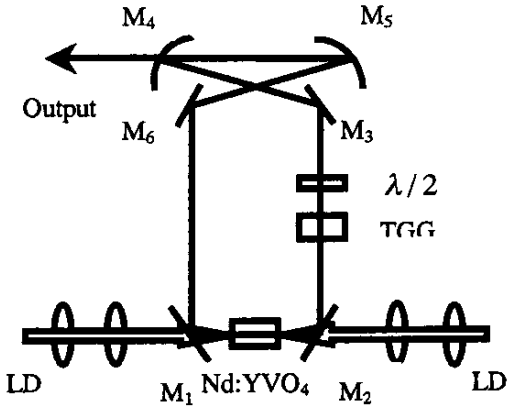


图 1 LD 双向端面泵浦的高功率连续单频 Nd : YVO₄ 激光器实验装置图

0.20。通过调节它们的工作温度,使其发射激光的中心波长落在 Nd : YVO₄ 晶体的吸收峰 808.7 nm 上。用由两个平面凸透镜构成的准直聚焦系统将泵浦光聚焦到 Nd : YVO₄ 晶体,准直聚焦系统的传输效率为 85%。M₁ 和 M₂ 为两个 45° 的平面输入耦合镜,对 808 nm 增透、1.064 μm 高反;M₃ 和 M₆ 为两个 45° 的平面镜,对 1.064 μm 高反;M₅ 为平凹镜,对 1.064 μm 高反;高反腔镜的反射率均大于 99.5%。M₄ 为输出耦合镜,对 1.064 μm 透射率为 17.6%。实验中所用 Nd : YVO₄ 晶体的 Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.3 at% ,尺寸为 3 mm × 3 mm × 8 mm ,沿 a 轴方向切割,通光长度为 8 mm ,两个通光面镀 1.064 μm 和 808 nm 双减反介质膜。激光晶体侧面用铝箔包裹(以达到良好的热接触)置于一个水冷紫铜块中,用控温仪对 Nd : YVO₄ 晶体进行控温,然后用循环冷却水将产生的热量带走。实验过程中将晶体温度控制在 11℃ ,控温精度为 0.05℃。在腔内插入由 λ/2 波片和放在磁场中的 TGG 晶体构成的光学单向器,磁场中的 TGG 晶体可使激光偏振方向旋转 7°,使激光器单向运转,消除空间烧孔效应。

在谐振腔的设计中,为了使激光器能稳定地单频运转,我们需要考虑满足谐振腔稳定性条件 |A + D| ≤ 2、热不灵敏条件以及激光晶体中泵浦光和振荡激光的模式匹配条件。在低泵浦功率的情况下,可以忽略激光晶体热效应的影响,模式匹配条件要

求振荡激光基模半径应不小于泵浦光光斑半径^[3]。但是,随着泵浦功率的提高,激光晶体因吸收泵浦光而产生的热效应几乎影响到激光器性能的各个方面:谐振腔的稳定性,振荡激光腔模尺寸,模式匹配效率,输出光束质量等,因此是设计高功率全固化激光器首要考虑的因素之一^[4]。在高泵浦功率的情况下,激光晶体的热效应除表现为热透镜外,还存在伴随热透镜的高阶球差^[5]。随泵浦功率变化的热透镜焦距使腔内模参数发生变化,将会影响腔的稳定性和输出功率的提高。而且,理论模型数值计算结果表明:伴随热透镜的高阶球差在热透镜中心及其附近很小,而在偏离中心较远的区域内,热致球差很快增大^[6]。与此相应,过大的振荡激光基模半径会使热透镜球差引起的热致衍射损耗急剧增大^[7],导致转换效率下降。因此,高泵浦功率下激光晶体内振荡激光基模半径应小于泵浦光光斑半径^[8]。

对于连续端面泵浦的情况,激光晶体中的热聚焦作用可等效为一个理想的薄透镜,等效热透镜焦距为^[9]:

$$f_t = \frac{\pi K_c \omega_{pa}^2}{(dn/dT)\xi P_{in} \eta_l [1 - \exp(-al)]}$$

对于沿 a 轴切割, Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.5 at% 的 Nd : YVO₄ 晶体^[10],热传导系数 K_c = 0.0054 W/mm·K,折射率随温度的变化率 $\frac{dn}{dT} = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6}/K$,吸收系数 α = 5.37 cm⁻¹,激光晶体长度 l = 8 mm;ξ 为泵浦功率中作为热沉积在晶体内的一部分功率与入射到晶体上的总功率的比值,ξ ≈ 20%;ω_{pa} 为激光晶体内泵浦光的平均光斑半径,约为 500 μm,传输效率 η_l = 0.85。根据上述参数计算,在泵浦功率为 40 W 时,热焦距 f_t ≈ 140 mm。而我们实验中采用的是 Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.3 at% 的 Nd : YVO₄ 晶体,上述参数的取值应该略有不同,根据实验测量结果,在泵浦功率为 32 W 时,晶体的热焦距约为 200 mm。

我们用 ABCD 矩阵来计算分析激光器的运转特性,定义 M₄ 到 M₅ 的距离为 l₁,从激光晶体中心经

M_1 、 M_6 到 M_5 的距离以及从激光晶体中心经 M_2 、 M_3 到 M_4 的距离均为 l_2 ， M_4 和 M_5 的曲率半径均为 100 mm。选取 $l_2 = 240$ mm，得到了稳定性参数

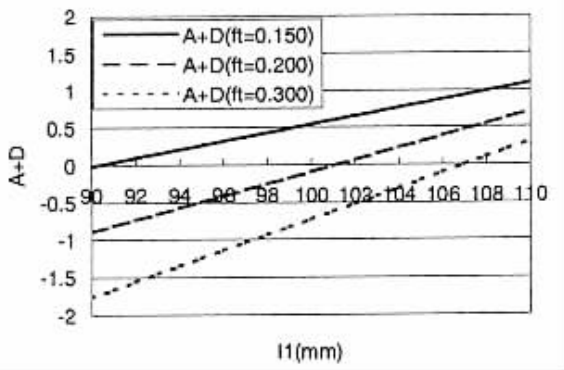


图 2 稳定性参数 $A+D$ 的值随 l_1 的变化曲线

由图 2 和图 3 可知，若将 l_2 取在 240 mm 附近， l_1 取在 99 mm 附近，Nd:YVO₄ 晶体放置在两个输入耦合镜中间，在泵浦功率为 32 W 时，满足谐振腔稳定性条件与热不灵敏条件，同时激光晶体中心处振荡激光基模半径 w_0 在 360 μm 左右，泵浦光平均光斑半径约为 500 μm ，满足模式匹配条件。

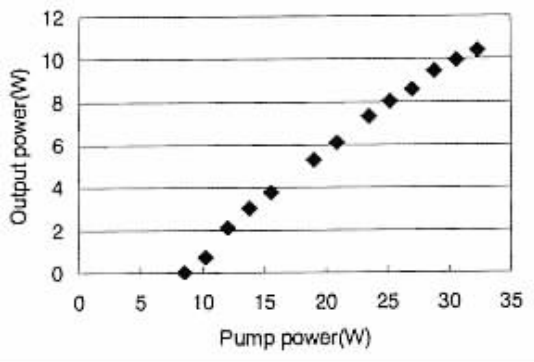


图 4 单频红外输出功率与泵浦功率的关系曲线

图 6 为实验监视的激光器在自由运转情况下的频率漂移，1 min 内激光器的频率漂移为 150 MHz 左右。由于环境振动的影响，激光器自由运转时的频率漂移比较大，在进一步的实验中我们将采用主

$A+D$ 的值以及激光晶体中心处振荡激光基模半径 w_0 随两凹面镜之间距离 l_1 的变化曲线，如图 2、3 所示。

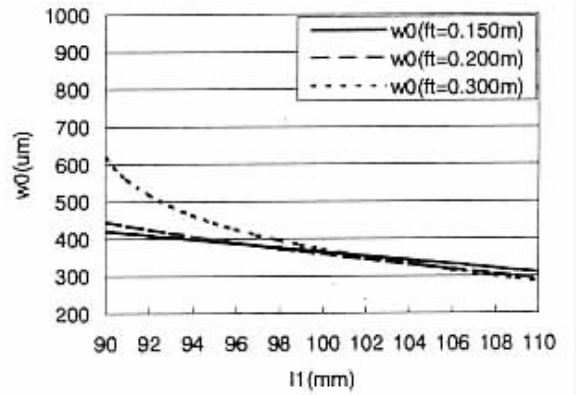


图 3 激光晶体中心处振荡激光基模半径 w_0 随 l_1 的变化曲线

2 实验结果及分析

图 4 为实验中测得的连续单频红外输出功率曲线。在总泵浦功率为 32.3 W 的情况下，获得 10.4 W 的单频 1.064 μm 红外输出，斜效率为 43.7%。

在红外输出功率为 10.4 W 的情况下，用法布里-珀罗腔监视输出激光的模式，如图 5 所示，激光器单频运转。法布里-珀罗腔的自由光谱范围为 750 MHz。

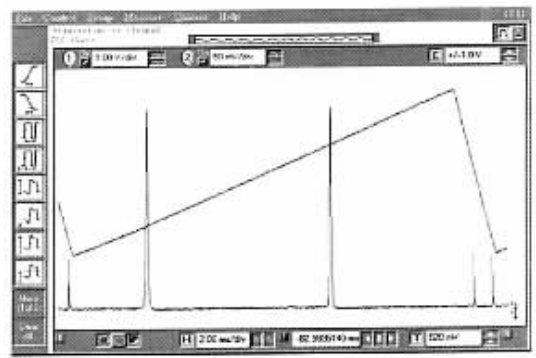


图 5 共焦参考腔监视的输出红外光的模式

动锁腔的办法将激光器的频率锁定在参考腔的中心频率上来改善激光器的频率稳定性。

图 7 为实验监视的单频红外激光器的长期功率波动，在单频红外输出功率为 10 W 的情况下，长期

(4 h)功率波动范围小于 1%。

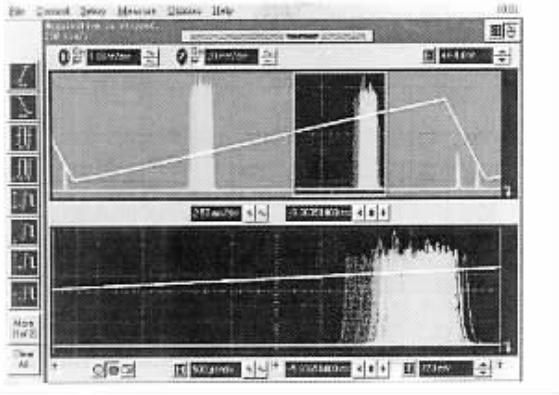


图 6 激光器自由运转时的频率漂移

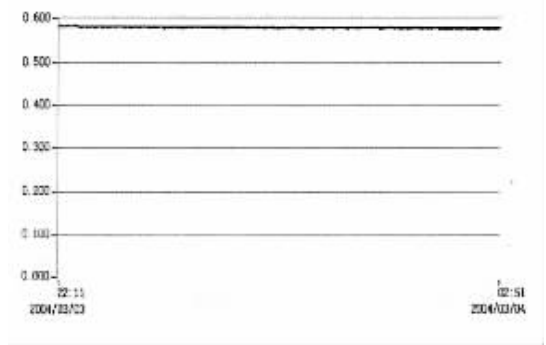


图 7 单频红外激光器的长期(4小时)功率波动范围

3 结论

我们报道了研制高功率连续单频 Nd : YVO₄ 激光器的实验结果。我们在考虑在高功率泵浦条件下激光晶体因吸收泵浦光而产生的热透镜效应的基础上,设计了六镜环行激光谐振腔,采用两个光纤耦

合输出的高功率激光二极管双端面泵浦结构,在总泵浦功率为 32.3 W 的情况下,得到 10.4 W 的单频 1.064 μm 红外输出,斜效率为 43.7%,长期功率稳定性优于 1%(4 小时),激光器自由运转时的频率漂移小于 150 MHz(1 分钟)。

参考文献:

[1] 王海波,马艳,郜江瑞等. LD 端面抽运 1.5 W 单频稳频绿光激光器[J]. 中国激光,2002,29(2):119-122.

[2] WANG Shaokai, GAO Jiangrui, et al. High power single frequency Nd : YVO₄ laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4914 : 10.

[3] FAN T Y. Pump source requirements for end - pumped lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1990, 26(2) : 311 - 316.

[4] 郑加安,赵圣之,王青圃等. LD 端面泵浦 Nd : YAG 固体激光器热效应研究[J]. 光子学报,2000,29(12) : 1121 - 1126.

[5] TIDWELL S C, SEAMANS J F, BOWERS M S, et al. Scaling CW diode - end - pumped Nd : YAG lasers to high average powers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 28(4) : 997 - 1009.

[6] FRAUCHIGER J, ALBERS P, WEBER H P. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end - pumped CW Nd : YAG lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 28(4) : 1046 - 1056.

[7] CHEN Y F, HUANG T M, KAO C F, et al. Optimization in scaling fiber - coupled laser - diode end - pumped lasers to higher power : Influence of thermal effect[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(8) : 1424 - 1429.

[8] PENG Xiaoyuan, XU Lei, ANAND ASUNDI. Power scaling of diode - pumped Nd : YVO₄ lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(9) : 1291 - 1299.

[9] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, et al. Thermal modeling of continuous - wave end - pumped solid - state lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1990, 56(19) : 1831 - 1833.

[10] 何京良,侯玮,张恒利等. LD 抽运 Nd : YVO₄ 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器[J]. 中国激光,2000,27(6) : 481 - 484.

High Power Single – frequency Nd : YVO₄ laser

Dual – end – pumped by Diode Laser

ZHAO Jingyun , ZHANG Kuanshou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Devices , Institute of Opto – Electronics , Shanxi University , Taiyuan , 030006 , P. R. China)

Abstract : A continuous – wave high power single – frequency Nd : YVO₄ laser dual – end – pumped by fiber – coupled laser diode is designed and experimentally demonstrated. Single – frequency infrared output power of 10.4W is achieved at the pump power of 32.3W. The slope efficiency is 43.7% and the fluctuation of output power is less than 1% in four hours.

Key words : LD dual – end – pumped ; high power ; single – frequency operation

规范关键词的选择

据国家标准

关键词的定义 :关键词是为了文献标引工作而从报告、论文中选取出来用以表示全文主题内容信息款目的单词和术语。一篇论文所列关键词之间应有一定逻辑组合关系 ,通过这种逻辑组合 ,提示论文主题内容。

单词 :是指只包含一个词素(语言中最小的有意的单位)的词或语言里最小的 ,可以自由运用的单位。

术语 :指某学科中的专门用语。

应在摘要后列出 ,每篇论文不少于 4 个。从技术角度考虑 ,没有关键词的论文应列入非学术论文类。这些关键词应按以下顺序选择 :

第 1 个关键词应列出该文主要工作内容或内容所属二级学科名称。

第 2 个关键词应列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第 3 个关键词应列出得到成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。

第 4 个关键词应列出前 3 个关键词中没有出现的 ,但被该文作为主要研究对象的事或物质的名称 ,或者作者认为重要的词。如果需要第 5 个、第 6 个等以后的关键词应是作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

关键词名尽量从《汉语主题词表》、《科学技术名词术语》等词表中选用规范词——叙词 ,未被词表收录的新学科、新技术的重要术语 ,亦可选用。

中英文关键词应一一对应 ,分别排在中英文摘要下方 ,关键词之间用“ ;”号隔开。

作者: 赵晶云, 张宽收
作者单位: 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西, 太原, 030006
刊名: 量子光学学报 ISTIC PKU
英文刊名: ACTA SINICA QUANTUM OPTICA
年, 卷(期): 2004, 10(2)
被引用次数: 4次

参考文献(10条)

1. 王海波;马艳;郜江瑞 LD端面抽运1.5 W单频稳频绿光激光器[期刊论文]-中国激光 2002(02)
2. WANG Shaokai;GAO Jiangrui High power single frequency Nd: YVO₄ laser 2002
3. Fan T Y Pump source requirements for end-pumped lasers[外文期刊] 1990(02)
4. 郑加安;赵圣之;王青圃 LD端面泵浦Nd: YAG固体激光器热效应研究[期刊论文]-光子学报 2000(12)
5. Tidwell S C;SEAMANS J F;BOWERS M S Scaling CW diode-end-pumped Nd: YAG lasers to high average powers[外文期刊] 1992(04)
6. Frauchiger J;ALBERS P;WEBER H P Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd: YAG lasers[外文期刊] 1992(04)
7. Chen Y F;HUANG T M;KAO C F Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: Influence of thermal effect[外文期刊] 1997(08)
8. Peng Xiaoyuan;XU Lei;ANAND ASUNDI Power scaling of diode-pumped Nd: YVO₄ lasers[外文期刊] 2002(09)
9. Innocenzi M E;YURA H T;FINCHER C L Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers 1990(19)
10. 何京良;侯玮;张恒利 LD抽运Nd: YVO₄腔内倍频连续波8.8 W绿光激光器[期刊论文]-中国激光 2000(06)

本文读者也读过(10条)

1. 崔芙云. 王海波. 马艳. 郜江瑞 激光二极管抽运的高输出单频稳频Nd: YVO₄激光器[期刊论文]-光学学报 2001, 21(3)
2. 张宽收. 赵晶云. 席文强. 彭堃堃 LD双端端面泵浦的高功率连续单频Nd:YVO₄激光器[期刊论文]-量子光学学报 2004, 10(z1)
3. 王海波. 马艳. 翟泽辉. 郜江瑞. 彭堃堃 LD端面抽运1.5 W单频稳频绿光激光器[期刊论文]-中国激光2002, 29(2)
4. 万顺平. 田芊. 孙利群. WAN Shun-ping. TIAN Qian. SUN Li-qun LD光纤耦合泵浦单频双向连续固体环形激光器[期刊论文]-红外与激光工程2007, 36(4)
5. 陈三斌. 周寿桓. 赵鸿. 唐晓军. 郭丽娜. 刘刚. 王超. CHEN San-bin. ZHOU Shou-huan. ZHAO Hong. TANG Xiao-jun. GUO Li-na. LIU Gang. WANG Chao 单频环形腔Nd:YVO₄激光器实验研究[期刊论文]-光学技术2010, 36(1)
6. 张铁犁. 姚建铨. 王鹏. 朱雪玉. 蔡志强. 张百钢. ZHANG Tie-li. YAO Jian-quan. WANG Peng. ZHU Xue-yu. CAI Zhi-qiang. ZHANG Bai-gang 端面抽运高功率连续单频1064 nm Nd:YVO₄环行腔激光器[期刊论文]-中国激光2007, 34(9)
7. 王雅君. 郑耀辉. 李凤琴. 彭堃堃. WANG Ya-jun. ZHENG Yao-hui. LI Feng-qin. PENG Kun-chi 全固态高功率单频激光器[期刊论文]-量子光学学报2010, 16(3)
8. 徐荣青. 陆耀东. 蓝信钜. XU Rong-qing. LU Yao-dong. LAN Xin-ju 一种新型单纵模连续Nd: YAG激光器[期刊论文]-华东船舶工业学院学报2000, 14(4)
9. 郝二娟. 檀慧明. 李特. 钱龙生. HAO Er-juan. TAN Hui-ming. LI Te. QIAN Long-sheng LD端面泵浦单频调Q激光器的研制[期刊论文]-激光与红外2007, 37(1)
10. 葛青. 于琳. 贾晓军. 苏晓龙. 谢常德. 彭堃堃. Ge Qing. Yu Lin. Jia Xiaojun. Su Xiaolong. Xie Changde. Peng

引证文献(4条)

1. [陈三斌](#), [周寿桓](#), [赵鸿](#), [唐晓军](#), [郭丽娜](#), [刘刚](#), [王超](#) [单频环形腔Nd:YVO₄激光器实验研究](#) [期刊论文]-[光学技术](#) 2010(1)
2. [侯军燕](#), [汪岳峰](#) [LD双端面抽运Nd:YVO₄折叠腔主振荡器的稳定性研究](#) [期刊论文]-[红外](#) 2009(1)
3. [李凤琴](#), [郑耀辉](#), [张宽收](#) [全固态高功率连续单横模Nd:YVO₄/LBO绿光激光器](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#) 2006(3)
4. [张铁犁](#), [姚建铨](#), [王鹏](#), [朱雪玉](#), [蔡志强](#), [张百钢](#) [端面抽运高功率连续单频1064 nm Nd:YVO₄环形腔激光器](#) [期刊论文]-[中国激光](#) 2007(9)

引用本文格式: [赵晶云](#), [张宽收](#) [LD双端面泵浦的高功率连续单频Nd:YVO₄激光器](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#) 2004(2)