

用于超短强激光与气体靶相互作用实验 的新型前置差分抽运系统

邓 健 钟方川 覃 岭 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所强光光学开放研究实验室 上海 201800)

提要 介绍了用于超短超强激光脉冲-脉冲气体靶相互作用研究的新型差分抽运系统,与高效高分辨率大面积透射光栅光谱仪配合,进行了超短激光脉冲辐照下氩气喷靶的软 X 射线发射特性的实验研究。实验表明,该谱仪有足够的灵敏度参与超短强激光脉冲辐照气体靶的软 X 射线产生、X 射线激光乃至高次谐波实验的软 X 射线光谱诊断工作。

关键词 差分抽运系统,超短强激光,脉冲气体靶,透射光栅光谱仪

1 引 言

近年来,超短强激光脉冲与气体靶相互作用的研究引起了人们的极大关注。在不同激光光强的辐照下,超短强激光脉冲与气体原子相互作用在高次谐波^[1]、光场电离 X 射线激光^[2,3]、团簇的 X 射线发射^[4],以及粒子加速器^[5,6]等新兴强场激光物理领域有着极为重要的理论研究和实际应用意义。

与研究激光-固体靶相互作用时不同,在上述激光-脉冲气体靶相互作用的研究中,所使用的光谱仪往往带前置差分抽运系统。简言之,差分抽运系统是一前端带有差分狭缝或小孔的筒状结构,后端与光谱仪密封为一体,前端靠近脉冲气体靶和靶点,气体靶点产生的高次谐波或 X 光信号光经由差分狭缝或小孔进入光谱仪并被接收器件探测。光谱仪另装有真空泵,及时将脉冲气体靶喷出的气体抽出,既可防止信号光被靶室内剩余气体吸收,又可保证光谱仪的接收器件,如软 X 射线 CCD 相机、微通道板(MCP)等能在较高真空度下正常运转^[7,8]。

在研制新型大面积透射光栅光谱仪^[9]并用于激光辐照固体靶的软 X 射线发射光谱诊断基础上,为将该光谱仪的应用范围拓宽到超短强激光脉冲与气体原子相互作用方面的实验研究,研制了新型的差分抽运系统,进行了超短超强激光脉冲辐照下,氩气喷靶的软 X 射线发射特性测量。

2 带前置差分抽运系统的光谱仪的结构

目前,国外实验室一般采用宽度 20~ 200 μm 的金属材料的狭缝与差分筒体固定为一体的差分抽运系统^[10],这种一体化的差分抽运系统的狭缝起两种作用,既作为光谱仪的入射狭

缝,以降低源加宽,又起隔离靶室和光谱仪,以利于光谱仪自带的真空泵完成对光谱仪的差分抽运作用。实验发现,这种类型的差分抽运系统在使用上有两个不足:第一,差分狭缝宽度和位置都不可调节。如果气体靶点在径向偏离光谱仪光轴较远,则经由差分狭缝进入光谱仪的信号光会大大偏离信号收集器件,这将有可能导致光谱仪接收不到信号。第二,由于差分狭缝一般距气体靶点较近(1~5 cm),在光谱仪正对激光束摄谱时,金属材料差分狭缝极易被会聚激光束打坏、扩大,造成过多激光能量进入光谱仪内部,这将导致数据的信噪比大大降低,并引起测量数据的失真和低重复性,甚至会损坏光谱仪的内部元件。

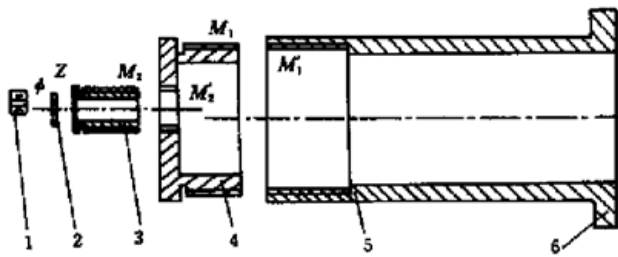


图1 新型差分抽运系统的结构图

Fig. 1 Schematic of novel differential pump system

- 1: differential slit; 2: differential orifice plate; 3: front differential head;
4: rear differential head; 5: differential tube; 6: end face platen

为克服传统差分抽运系统的不足,对其结构进行了改进,将差分狭缝和差分抽运系统的主体分离,并增强差分狭缝的抗激光破坏性和调节性能,使之能在较大范围内对准实际靶点的位置。研制的新型差分抽运系统的结构如图1所示,由差分狭缝1,差分孔片2,前差分头3,后差分头4,以及端面带有端面压板6的差分筒5五部分构成。差分狭缝作为光谱仪的入射狭缝,降低源加宽;差分孔片上的小孔与差分狭缝宽度相当,隔离靶室和光谱仪,以利于光谱仪的真空泵

对光谱仪进行差分抽运。

差分狭缝由陶瓷片、玻璃片、石英片等抗激光破坏性较强的片状材料构成,以提高其耐用性。其缝宽为50~200 μm ,厚度为5 mm,独立安装在五维调整架上,置于真空靶室内靠近气体喷靶靶点,其缝宽和位置可根据不同的测量要求方便地变换和调节,以对准实际的靶点位置,有很高的灵活性和可操作性。

差分抽运系统的调节采用偏心调整机构,如图1所示。后差分头靠后端面的外螺纹 M_1 啮合到差分筒的前端面内螺纹 M_1' 之中,前差分头靠后端面的外螺纹 M_2 啮合在后差分头前端口上的偏心内螺孔 M_2' 内。在前差分头靠近靶点的前端面上有止口Z,差分孔片置于上述止口Z内,同时差分孔片上有偏心通孔 ϕ 。上述各零件之间的螺纹连接可方便地调节整个差分抽运系统的长度;而且,双偏心孔的联合调节可实现差分孔片上的偏心通孔 ϕ 在差分抽运系统轴线周围较大的范围(~ 15 mm)内自由搜寻实际气体喷嘴处靶点的位置,提高实验的灵活性。

带前置差分抽运系统的XUV透射光栅光谱仪结构和相关实验布局如图2所示。该光谱仪由差分抽运系统、镀金超环面镜、无支撑1000线/mm大面积透射光栅(表面尺寸1 mm \times 4 mm)和软X光CCD相机等组成。摄谱范围为1.4~75 nm,光谱分辨率为

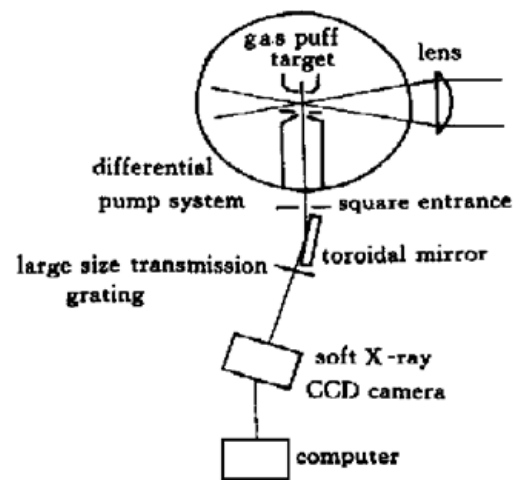


图2 带前置差分抽运系统的大面积透射光栅光谱仪的结构及实验布局

Fig. 2 Schematic of the large size transmission grating spectrograph with differential pump system and experiment setup

0.25 nm。超环面镜做软 X 射线成像系统, 使该光谱仪具有较高的收集效率, 尤其适用于高功率低能量的超短强激光脉冲与物质相互作用的软 X 光光谱诊断。差分抽运系统置于真空靶室内并正对气体靶靶点, 端面压板与真空靶室的窗口法兰密接。在光谱仪的外套筒上还焊接有真空法兰, 以连接真空泵。本光谱仪所配备的新型差分抽运系统, 已参与超短激光脉冲光场电离 Ar 气体喷靶的软 X 射线发射实验, 并完成了实验考核, 证明了本光谱仪及新型差分抽运系统的可靠性和有效性。

3 实验安排和结果

实验安排如图 2 所示, 由飞秒激光器、电磁驱动脉冲气体阀、大面积透射光栅光谱仪以及软 X 光 CCD 相机组成。上海光机所强光光学开放研究实验室建成的 2 TW/45 fs 的钛宝石激光器^[11]的中心波长为 785 nm, 线宽为 18 nm, 可提供的最大能量为 120 mJ。激光束由焦距 500 mm 的 $f/10$ 透镜聚焦到气体阀喷口以下 2 mm 处, 焦斑线度约 100 μm , 电磁驱动气体阀喷口直径为 1 mm, 以外触发方式完成喷气时间与激光脉冲的同步。在强光光学开放研究实验室进行的高次谐波实验中, 该气体阀在 30 mJ 的激光脉冲辐照下用 1 m 掠入射光栅谱仪曾观测到氙气的 81 次谐波信号^[12]。聚焦透镜和气体阀都位于真空靶室内。实验过程中, 靶点偏离光谱仪的设计摄谱轴线为 5~9 mm 不等, 借助差分抽运系统的灵活可调性, 使光谱仪对气体靶点的软 X 射线的摄谱得以实现。

大面积透射光栅光谱仪对接于真空靶室上, 在打靶激光束的侧向 90°方向观测气体靶点处的软 X 射线发射。差分狭缝宽 1 mm, 位于距靶点 10 mm 处。差分抽运系统置于真空靶室内并与光谱仪外筒密封为一体, 前端的差分孔 ($\phi 2$ mm) 近抵狭缝; 光谱仪外筒上另接一分子泵, 使谱仪内部保持较高的真空度。实验过程中, 由于脉冲气体靶的连续喷气, 真空靶室的真空度通常降低到 0.5 Pa 左右。在光谱仪所带分子泵及差分抽运系统的抽运下, 谱仪内部的真空仍能维持在 8×10^{-3} Pa 以下, 使软 X 光 CCD 相机能正常运转, 可见该新型差分抽运系统的有效性。

整个测量过程中, 气体阀的托压维持在 0.3 MPa, 激光脉冲能量为 25~80 mJ。为研究不同的测量条件下, 特别是不同的气体密度时氙气的 X 射线发射强度的变化趋势, 改变气体的喷气大小, 使喷氙气时靶室真空度在 0.05~0.8 Pa 之间变化, 得到不同密度下氙气的 X 射线谱如图 3 所示, 摄谱积分时间为 20 min, 靶点处光强为 2.3×10^{16} W/cm²。

图 3 中 (a), (b), (c) 各谱对应的靶室真空度分别为 0.1 Pa, 0.6 Pa, 0.8 Pa, 表 1 给出了图 3

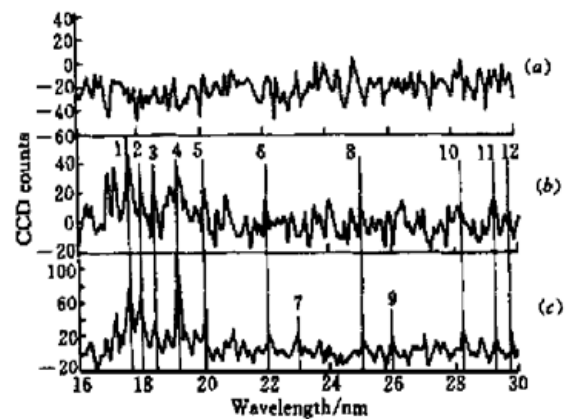


图 3 超短脉冲激光辐照下氙喷气靶的软 X 射线光谱, 由软 X 射线 CCD 相机和 1000 线/mm 光栅接收。靶点处激光光强为 2.3×10^{16} W/cm², 靶室真空度分别为 (a) 0.1 Pa; (b) 0.6 Pa; (c) 0.8 Pa

Fig. 3 Soft X-ray spectra from the ultrashort pulsed laser irradiated Ar puff target under various chamber gas pressure condition, recorded with the soft X-ray CCD camera and the 1000 lines/mm grating. The laser intensity on the target spot is 2.3×10^{16} W/cm², and the gas pressure of target chamber is (a) 0.1 Pa; (b) 0.6 Pa; (c) 0.8 Pa, respectively

中注明的谱线的跃迁能级和波长^[13]。可以看出,氩气在 0.1 Pa 下几乎没有 X 射线发射被该谱仪接收到,0.6 Pa 时的 X 射线发射明显增强,到 0.8 Pa 时 X 射线强度进一步提高,并新增加了两条 Ar^{7+} 的发射谱线: $2p^6 3p-2p^6 4s$ (22.94~23.09 nm) 和 $2p^6 3d-2p^6 4f$ (26.03 nm)。可见随着与激光相互作用的气体密度的增加,氩的 X 射线发射增强。此外,由发射光谱可以看出, X 射线的波长范围很窄,主要集中在 17~30 nm 的一段,表明氩原子被光场电离后,相互作用区内仅有 Ar^{5+} , Ar^{6+} , Ar^{7+} 几个离化态,这与用飞行时间谱仪测量惰性原子气体的超短脉冲光电离实验^[14]得出的结论是一致的。

表 1 图 3 中标识的各谱线的跃迁及波长(单位: nm)

Table 1 Transition configurations and wavelengths (in nm) of spectral lines illustrated in Fig. 3

1	$\text{Ar}^{-} 3s^2-3s4p$	17.66	7	$\text{Ar}^{-} 2p^6 3p-2p^6 4s$	22.94~23.09
2	$\text{Ar}^{-} 3s^2 3p-3s^2 5d$	18.01~18.07	8	$\text{Ar}^{-} 3s 3p-3s 4s$	24.94~25.09
3	$\text{Ar}^{-} 2p^6 3d-2p^6 5f$	18.43	9	$\text{Ar}^{-} 2p^6 3d-2p^6 4f$	26.03
4	$\text{Ar}^{-} 3s 3p-3s 4d$	19.18~19.26	10	$\text{Ar}^{-} 3s 3p^2-3s 3p 4s$	28.14~28.32
5	$\text{Ar}^{-} 2p^6 3d-2p^6 5p$	20.00~20.01	11	$\text{Ar}^{-} 3s^2 3p-3s^2 4s$	29.22~29.41
6	$\text{Ar}^{-} 3s^2 3p-3s^2 4d$	21.99~22.10	12	$\text{Ar}^{-} 3s 3d-3s 4f$	29.76~29.77

表 2 氩原子及前七阶离化态的光场电离阈值激光光强和饱和激光光强

Table 2 OFI threshold and saturation laser intensity of Ar atom and first seven charge states

	U_I /eV	I_{th} (BSI theory) /W/cm ²	I_{th} (ADK theory) /W/cm ²	I_{th} /W/cm ²	I_{sat} /W/cm ²
Ar^{-}	15.76	2.47×10^{14}	1.41×10^{14}	1.36×10^{14}	1.03×10^{15}
$\text{Ar}^{-} (\text{Ar}^{1+})$	27.63	5.83×10^{14}	3.98×10^{14}	4.13×10^{14}	2.05×10^{15}
$\text{Ar}^{-} (\text{Ar}^{2+})$	40.74	1.22×10^{15}	8.22×10^{14}	9.50×10^{14}	5.09×10^{15}
$\text{Ar}^{-} (\text{Ar}^{3+})$	59.81	3.20×10^{15}	2.05×10^{15}	2.52×10^{15}	7.85×10^{15}
$\text{Ar}^{-} (\text{Ar}^{4+})$	75.02	5.07×10^{15}	3.09×10^{15}	4.15×10^{15}	1.16×10^{16}
$\text{Ar}^{-} (\text{Ar}^{5+})$	91.01	7.62×10^{15}	4.42×10^{15}	6.39×10^{15}	2.85×10^{16}
$\text{Ar}^{-} (\text{Ar}^{6+})$	124.32	1.95×10^{16}	1.11×10^{16}	1.59×10^{16}	3.82×10^{16}
$\text{Ar}^{-} (\text{Ar}^{7+})$	143.46	2.65×10^{16}	1.44×10^{16}	2.20×10^{16}	1.85×10^{18}

利用光场电离理论对实验条件下气体 Ar 原子的电离行为进行了模拟,表 2 给出了氩⁻至氩⁷⁺在两种光场电离理论模型^[14]下的阈值电离光强和饱和光强,即 BSI 电离模型(适用于类氢原子/离子体系,计算结果为表 1 的第 3 列)和 ADK 电离模型(适用于多电子的复杂原子/离子体系,表 1 的第 4~6 列)。其中 U_I 为氩原子及前七阶离化态的电离能;第四栏的数据来源于 Burnett 等给出的计算方法^[15],即对常振幅的激光电场,取每阶离化态的 ADK 电离速率 $W_{ac}(z)$ 为 10^{12} s^{-1} 时的光强 I_{th} ;第五、六栏的数据是在考虑激光脉冲包络情况下,由电离方程出发计算得到的各阶离化态产生的阈值电离光强和饱和光强^[15]。可见在 $2.3 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 功率密度的激光脉冲辐照下,氩原子体系将被迅速电离至 Ar^{7+} 离化态,使原子系统中只剩下电离势高的几个离化态如 Ar^{5+} , Ar^{6+} , Ar^{7+} 等有较高的丰度,从而贡献了较强的 X 射线发射。因此,实验结果验证了光场电离后离子体系中仅存少数几个离子态。

4 总 结

为将新型高效高分辨率大面积透射光栅光谱仪用于超短强激光脉冲与气体原子相互作用等前沿领域的实验研究, 研制了新型差分抽运系统, 提高了差分狭缝的抗激光破坏性和耐用性; 采用偏心调整机构, 针对气体靶点的实际位置, 使差分抽运系统可灵活地对准气体靶点的实际位置。利用该带前置差分抽运系统的大面积透射光栅光谱仪, 对超短强激光脉冲辐照下氙气喷靶的软 X 射线发射进行了光谱诊断。实验考核表明, 该前置差分抽运系统配合大面积透射光栅光谱仪, 有足够的灵敏度参与超短强激光脉冲辐照气体靶的软 X 射线产生, X 射线激光乃至高次谐波实验工作, 可以作为成熟的探测手段, 参与进行惰性气体离子的高次谐波实验, 在打靶光路的侧向观察, 有潜力完成气体原子的电离对谐波转换效率、相位匹配、谐波强度的影响等方面的研究。

参 考 文 献

- 1 Ch. Spielmann, N. H. Burnett, S. Sartania *et al.*. Generation of coherent X-rays in the water window using 5-femtosecond laser pulses. *Science*, 1997, **278**(5338): 661~ 664
- 2 D. V. Korobkin, C. H. Nam, S. Suckewer. Demonstration of soft X-ray lasing to ground state in Li⁺. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(26): 5206~ 5209
- 3 B. E. Lemoff, G. Y. Yin, C. L. Gordon *et al.*. Demonstration of a 10-Hz femtosecond-pulse-driven XUV laser at 41.8 nm in Xe⁺. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(9): 1574~ 1577
- 4 T. Ditmire, R. A. Smith, J. W. G. Tisch *et al.*. High intensity laser absorption by gases of atomic clusters. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(16): 3121~ 3124
- 5 G. Malka, E. Lefebvre, J. L. Miquel. Experimental observation of electrons accelerated in vacuum to relativistic energies by a high-intensity laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(17): 3314~ 3317
- 6 R. Wagner, S. Y. Chen, A. Maksimchuk *et al.*. Electron acceleration by a laser wakefield in a relativistically self-guided channel. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(16): 3125~ 3128
- 7 G. Pretzler, E. E. Fill. X-rays from optical-field ionized plasmas at low density. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 733~ 735
- 8 A. B. Borisov, X. Shi, V. B. Karpov *et al.*. Stable self-channeling of intense ultraviolet pulses in underdense plasma, producing channels exceeding 100 Rayleigh lengths. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(10): 1941~ 1947
- 9 Deng Jian, Zhong Fangchuan, Qing Ling *et al.*. Development of soft X-ray spectrograph for ultrashort pulse laser produced plasma diagnosis. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(10): 1114~ 1117 (in Chinese)
- 10 B. E. Lemoff, G. Y. Yin, C. L. Gordon *et al.*. Femtosecond-pulse-driven 10-Hz 41.8-nm laser in Xe⁺. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(1): 180~ 184
- 11 Xu Zhizhan, Luc Vigroux, Frederic Saviot *et al.*. 2 TW/45 fs Ti:sapphire ultrashort pulse intense laser system. *Science in China A* (中国科学 A), 1997, **27**(7): 640~ 645 (in Chinese)
- 12 Xu Zhizhan, Zhang Zhenquan, Li Xuexing *et al.*. Coherent soft X-ray radiation obtained by high-order harmonic generation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(7): 957~ 958 (in Chinese)
- 13 R. L. Kell'y. Atomic and Ionic Spectrum Lines below 2000 Angstroms: Hydrogen through Krypton Part I (H-Cr) (Published by the American Chemical Society and the American Institute of Physics for the National Bureau of Standards, 1987)
- 14 S. Augst, D. D. Meyerhofer, D. Strickland *et al.*. Laser ionization of noble gases by Coulomb-barrier suppression. *J. Opt. Soc., Am. B*, 1991, **8**(4): 858~ 867
- 15 N. H. Burnett, P. B. Corkum. Cold-plasma production for recombination extreme-ultraviolet lasers by optical-field-induced ionization. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(6): 1195~ 1199
- 16 Deng Jian, Zhong Fangchuan, Qing Ling *et al.*. Average residual energy calculation of optical field ionized atom system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(8) (in Chinese)

Development of Novel Differential Pump System in Ultrashort Pulsed Laser-gas Puff Target Interaction Experiments

Deng Jian Zhong Fangchuan Qing Ling Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A novel differential pump system is presented. Combined with a high efficiency, high spectral resolution large size transmission grating spectrograph, the differential pump system is especially suitable for the research of the ultrashort pulsed laser-gas puff target interaction. The experiments on soft X-ray spectral diagnosis of Ar puff target irradiated by femtosecond laser pulses are carried out. The results show that the spectrograph is a powerful tool of spectral diagnosis in experiments on the ultrashort pulsed laser-gas puff target interaction, optical-field ionization soft X ray laser, and high-harmonic generation.

Key words differential pump, ultrashort laser pulse, gas puff target, transmission grating spectrograph

LD 抽运实现 Er, Yb 共掺磷酸盐玻璃微片连续激光输出

掺铒激光玻璃能实现 1.54 μm 波长的激光, 对人眼安全, 又处于通信窗口, 可以应用于通信和测距仪等方面。

我们利用自己制备的 Er, Yb 共掺磷酸盐玻璃(铒离子荧光寿命 $\tau = 7.5 \text{ ms}$, 峰值发射截面 $\sigma_{\text{em}} = 0.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, Yb_2O_3 浓度: 15.6 wt-%, Er_2O_3 浓度: 0.5 wt-%), 用中国科学院北京半导体研究所的 974 nm (2 W) 半导体激光器作为抽运源, 利用两个透镜对 LD 抽运光进行整形, 入射到铒玻璃上抽运光的光斑大小约为 50~80 μm , 形状为椭圆形。铒玻璃的厚度为 2 mm, 一面镀 974 nm 增透膜 ($T = 92\%$), 1540 nm 全反膜, 另一面镀 1540 nm 增透膜(对 970 nm 透过率为 70%, 对 1540 nm 透过率为 99.9% 以上), 输出耦合镜在 1540 nm 的透过率 $T = 0.4\%$, 在 970 nm 透过率为 55%。共振腔长约 12 mm。输出光功率是经过两个截止波长为 1100 nm 的滤波片过滤抽运光后测得的。在上述实验条件下, 实现了稳定的连续激光输出。具体激光参数如下: 激光振荡阈值 $E_{\text{th}} = 118 \text{ mW}$, 斜率效率 $\eta = 10.3\%$, 最大输出功率为 43 mW。激光波长峰值位于 1532 nm, 激光光谱半高宽为 4 nm, 单横模输出。所得斜率效率与国外相近厚度玻璃样品中的相当 ($\eta = 9.5\%$ ^[1]), 比国内 1999 年报道^[2]的 5.3% 几乎高一倍。由于共振腔镀膜参数不够理想, 激光振荡阈值偏高。

参 考 文 献

- 1 P. Laporta, S. Taccheo, O. Svelto. High power and high efficiency diode pumped Er-Yb glass laser. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(5): 490~492
- 2 Song Feng, Chen Xiaobo, Feng Yan *et al.*. Er³⁺, Yb³⁺ codoped phosphate glass laser pumped LD. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **26**(9): 790~792

中国科学院上海光机所 上海 201800

胡丽丽 柳祝平 祁长鸿

收稿日期: 2000-07-11; 收到修改稿日期: 2000-07-20