

光泵浦 XeF(C-A) 激光技术研究进展

于力, 刘晶儒, 易爱平, 马连英, 李辉,
黄超, 安晓霞, 陈广宇, 朱峰, 叶锡生

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 综述了西北核技术研究所光泵浦 XeF(C-A) 激光技术研究方面取得的成果, 研制的 10 J 级激光器最大输出能量为 18.7 J, 总转换效率达到 0.25%, 在国际上首次实现了 XeF(C-A) 激光重频运行, 运行频率 0.1~1 Hz; 描述了光泵浦源的结构和供气装置的研制; 介绍了在高重频光泵浦源和激光线宽压缩研究方面的最新进展, 光泵浦源最高运行频率达 90 Hz, XeF(C-A) 激光线宽已被压缩到 1 nm。

[关键词] XeF(C-A) 激光; 光泵浦; 蓝绿激光; 重频运行; 线宽压缩

[中图分类号] TN248.5 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)09-0033-06

1 前言

自从 20 世纪 70 年代末出现 XeF(C-A) 激光, 其显著特性就备受科学界、军事界的关注和青睐。其特性主要表现为: a. 辐射范围为 450~520 nm, 中心波长 480 nm, 属于蓝绿波段, 是大气、水下的最佳传输窗口; b. 激光饱和能量密度比其他准分子激光高一个量级 (50 mJ/cm^2); c. 增益带宽很宽 ($\sim 70 \text{ nm}$), 允许的超短光脉冲放大可短到 10 fs; d. 具有定标放大能力。上述特性可使该类激光在光电对抗、水下探测、超短脉冲激光放大以及大功率激光器的研制等领域具有广阔的应用前景。

获得 XeF(C-A) 激光的泵浦方式有 3 种: 电子束泵浦、放电泵浦和光泵浦。由于电子对激光上能级的猝灭作用, 电子束泵浦和放电泵浦方式的转化效率都很低, 而且电子束泵浦的装置庞大, 目前广泛应用的是光泵浦方式。光泵浦方式以 XeF₂ 蒸气作为激光激活介质, Ar 和 N₂ 作为缓冲气体。激光反应动力学过程如图 1 所示, XeF₂ 蒸气在 130~180 nm 真空紫外波段存在强烈吸收^[1], XeF₂ 主要被光解离为 B 态 XeF*(B) 分子, 该分子与缓冲气体分子碰撞弛豫形成 C 态 XeF*(C) 分子, C 态向 A 态跃

迁形成 XeF(C-A) 辐射, 受激辐射条件下形成中心波长为 480 nm 的 XeF(C-A) 蓝绿激光。

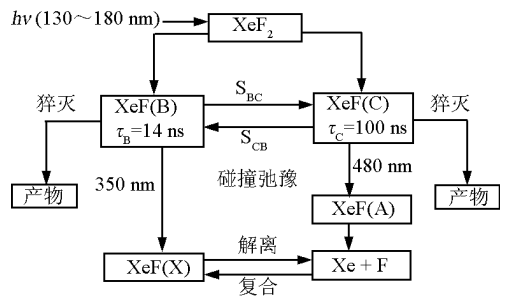


图 1 光泵浦 XeF 激光反应动力学

Fig. 1 Kinetic scheme of the optical pumping XeF laser

俄、美、法等国先后利用光泵浦技术开展了 XeF(C-A) 激光器研究。1992 年, 俄罗斯列别捷夫物理研究所与天体物理研究所合作采用三通道分段表面放电光泵浦技术研制的 XeF(C-A) 激光器输出能量达 117 J^[2]。1997 年, 法国马赛大学 LP3 实验室 M. Sentis 等人利用沿铁氧体棒表面放电光泵浦技术研制成功了小型化的焦耳级激光器, 输出能量为 1.3 J^[3]。2003 年, 美国伊利诺斯大学的 B. A. Knecht 等人利用多间隙表面放电技术研制了结构

[收稿日期] 2008-12-17; 修回日期 2009-04-08

[作者简介] 于力(1969-), 男, 西安市人, 西北核技术研究所副研究员, 研究方向为激光技术及应用; E-mail: yuli057@163.com

紧凑的桌面型光泵浦激光系统,激光脉冲输出能量大于 50 mJ^[4]。

20 世纪末以来,在超短光脉冲放大领域人们提出了混合放大系统的概念,即系统前端采用固体激光器产生超短激光脉冲,而放大级采用具有放大能力的气体激光放大器,这样可以避免使用光学系统复杂而且昂贵的啁啾脉冲压缩和展宽技术,从而实现超短光脉冲的直接放大。光泵浦 XeF(C-A) 激光在介质非线性效应、光脉冲对比度、增益带宽方面具有独特的优越性,因此,对光泵浦 XeF(C-A) 激光的研究再度成为热点。目前,列别捷夫研究所和法国马赛大学 LP3 实验室在光泵浦 XeF(C-A) 激光放大器以及相关放大技术研究方面均已获得初步的研究成果^[5,6],LP3 实验室正在建立 10 TW 的飞秒激光放大系统^[7]。我国研究 XeF(C-A) 激光起步较晚,但发展迅速。从 1995 年开始,西北核技术研究所一直致力于光泵浦 XeF(C-A) 激光领域的研究。

2 激光器件

自开始研究光泵浦 XeF(C-A) 蓝绿激光以来,西北核技术研究所已研制了多台激光器装置。1997 年首次获得 XeF(C-A) 辐射输出^[8];1999 年和 2000 年先后在两台不同激光装置上获得了毫焦量级和百毫焦量级的激光输出^[9,10];2002 年研制成功了焦耳量级激光器并获得了大于 1 J 的输出^[11,12];2005 年研制成功了 10 J 量级激光器。目前,该激光器实现了重复频率运行,频率 0.1 ~ 1 Hz,单脉冲输出能量大于 10 J,最大能量为 18.7 J,总转换效率达到 0.25%,效率指标是国际上当前同类激光器的最好水平,光泵浦 XeF 激光器实现重复频率运行在世界上尚属首次^[13]。

10 J 级激光器装置如图 2 所示,激光气室主体长 167 cm,宽 8 cm,高 20 cm。泵浦源采用模块化结构,4 个泵浦源模块分别对称安装于激光气室的两侧,激光器总有效增益长度 120 cm。相对的泵浦源模块的放电基板表面间距为 4.5 cm。输出窗采用布儒斯特窗,口径 5 cm × 5 cm。总储能电容量为 24 μF,工作电压 25 kV。谐振腔采用平凹腔,输出镜对 450 ~ 510 nm 波段的透过率为 10%,反射镜反射率优于 99.5%,腔长 210 cm。

图 3 至图 5 分别是连续的 9 个激光脉冲波形、激光光谱和激光远场焦斑图像。激光脉宽约为



图 2 XeF(C-A) 激光装置
Fig. 2 XeF(C-A) laser device

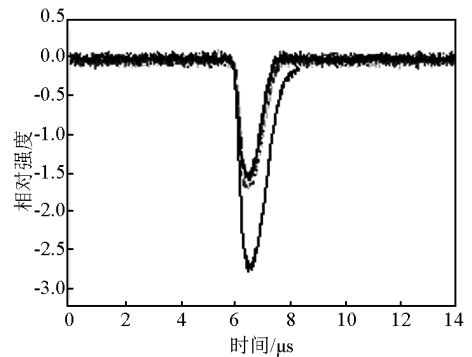


图 3 0.25 Hz 条件下连续 9 个激光脉冲的波形

Fig. 3 The waveform of 9 consequent laser power with the 0.25 Hz repetition rate

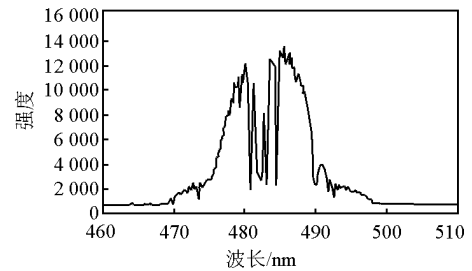


图 4 XeF(C-A) 激光光谱

Fig. 4 The spectrum of the XeF(C-A) laser radiation

1 μs,光谱范围为 475 ~ 491 nm,激光发散角在 x 方向为 5.3 mrad,y 方向为 3.4 mrad。

3 泵浦源

表面放电能够在从真空到几个大气压的很宽的条件下产生很强的宽带辐射并且具有强的真空紫外辐射和较高的产额,因此,表面放电通常被用作 XeF 激光的光泵浦源。

产生大功率 XeF(C-A) 激光对表面放电光泵

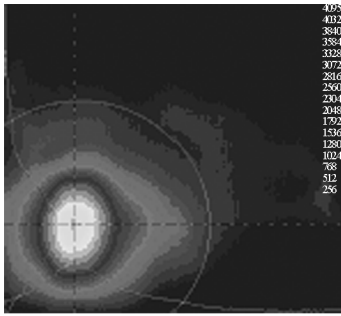


图5 激光远场光斑

Fig. 5 The far - field laser beam pattern

泵源有两个基本要求。第一,表面放电等离子体辐射具有较高的亮度温度;第二,泵浦源放电方式可以控制。在有限的初始储能条件下,为了获得较高的辐射亮度温度,要求初始储能较短的时间里集中释放到单一的放电通道中,从而形成辐射亮度温度很高的柱状等离子体。以这种放电形式作为激光器的光泵浦源则要求放电通道与激光腔轴方向一致,即轴向光泵浦。一般情况下,产生激光需要较长的增益区域,为了达到能量短时间集中释放的目的,可以将长的区域分为若干个较短的区域,在每个小区域中采用独立放电泵浦方式,这就是分段表面放电光泵浦的概念。泵浦源放电方式可以控制主要是指泵浦源放电行为在时间和空间上可控,即泵浦源在电容充电后不能随意发生自击穿,而是在外部触发作用下多个间隙同时放电,且在空间上放电必须沿设计的路径进行。

泵浦源研究经历了多种源结构研制的过程(如大面积横向泵浦源^[14]、片状电极分段放电泵浦源^[9]、多通道横向泵浦源^[15]等),解决了触发方式、多间隙放电同步、表面放电电化学特性诊断、辐射特性诊断等一系列关键技术。最终,作为大功率XeF(C-A)激光器的泵浦源设计为带有触发电极和等离子体导槽的T形电极分段表面放电结构,如图6所示。多个T形电极沿轴向依次排列,相邻的两个电极和一个电容器构成一个独立的放电回路,每一对电极间的放电基板上开设有放电等离子体导槽,一对电极对应一个放电通道。每个放电通道下方埋设有共用的触发电极,当外加触发时,由于绝缘基板表面比电容的作用,使得电极两端产生强场畸变,出现强烈的预电离,从而使表面放电快速形成,而且放电通道将严格按照设计的路径进行。

图7给出了两种不同的分段表面放电光泵浦源,上面为单通道泵浦源,下面是双通道泵浦源。在

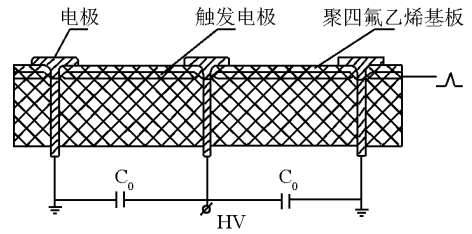


图6 泵浦源结构图(部分)

Fig. 6 Schematic diagram of the pump source (part)

充电电压30 kV、电容1 μF条件下,单通道泵浦源的最大放电电流可达42 kA,单位长度的平均沉积功率可达16.5 MW/cm,放电沉积效率高于70%。双通道泵浦源由于放电回路的电阻和电感均比单通道泵浦源小,最大放电电流可达53 kA,但由于放电被分配到两个通道中,单位长度的平均沉积功率为9.5 MW/cm。

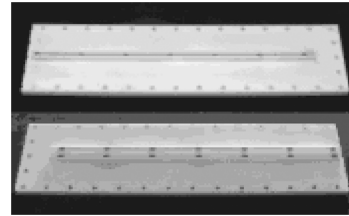


图7 两种不同结构的表面放电泵浦源

Fig. 7 Two kinds of surface discharge pumping sources

两种泵浦源均能使XeF₂分子获得解离并形成光解离波,图8是在双向泵浦条件下用分幅相机拍摄的两种泵浦源的XeF₂光解离波图像,图下的时间为拍摄时刻距放电起点的延时时间,单幅曝光时间为5 ns。两种泵浦源相比,单通道泵浦源由于平均沉积功率高,激励产生的XeF₂光解离层辐射亮度高;双通道泵浦源激励的光解离层辐射亮度低但解离区域大。在充电电压25 kV、总储能电容为24 μF的条件下,利用两种泵浦源均获得了激光输出,单通道泵浦源的激光输出高于10 J,双通道泵浦源的激光输出大于1 J。如果将双通道泵浦源用于更高的初始储能条件下,其产生的激光输出会更大。

4 供气装置

XeF₂在常温下为固体,有一定的饱和蒸气压。从XeF激光反应动力学可知XeF₂分子解离后不可

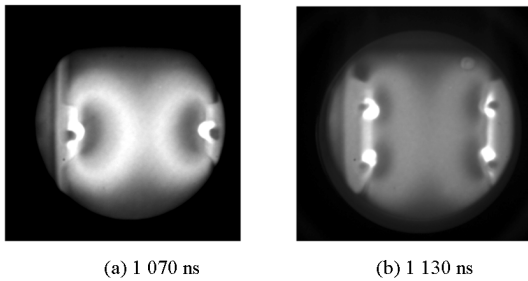


图 8 双向泵浦光解离波图像

Fig. 8 Photodissociation waves propagating in opposite directions

复合,为了实现激光器的重复频率运行,必须有供气装置不断地给气室中提供新鲜的 XeF_2 ,激光混合气体的供给成为 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光重频运行研究中重要的环节。 XeF_2 气体供给装置结构示意图如图 9 (a)所示,装置主要由 XeF_2 发生器、加热器、混合器、流量计和阀门构成。其工作原理是: Ar, N_2 气体作为 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光器的缓冲气体预先按 $V_{\text{Ar}}: V_{\text{N}_2} = 3:2$ 的比例配制好并装入气瓶中,将 Ar, N_2 混合气体分为两路,气体流量大的一路称为主气路,气体经流量计和加热器进入预混器;气体流量小的另一路称为支气路,气体经流量计流进 XeF_2 发生器中,并从该发生器中携带出一定浓度的 XeF_2 流进预混器。两路气体充分混合后进入激光气室,气室内的 XeF_2 浓度由浓度探测计实时监测。 XeF_2 发生器内部设计为水浴结构以保证 XeF_2 晶体处于恒定的温度环境和产生恒定的饱和蒸气压,两气路的管道均需加热,而且加热温度与 XeF_2 发生器水浴温度应相当以防止 XeF_2 在管壁上凝结。研制的 XeF_2 气体供给装置如图 9(b)所示。

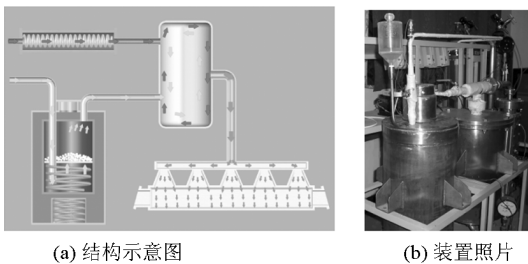


图 9 混合气体发生器

Fig. 9 Schematic diagram of the mixture gases

$\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光器重复频率运行时,要求进入激光气室的 XeF_2 气体的浓度保持在一定的范围内 ($(0.6 \sim 1.4) \times 10^{17}/\text{cm}^3$)。可以通过调节 XeF_2 气

体发生器加热温度、支气路流速及主气路流速来实现对 XeF_2 浓度的控制,在加热温度 65°C ,支气路流速 1 L/s ,主气路流速 10 L/s 情况下气室内 XeF_2 浓度可在 $1.0 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 附近保持超过 150 s 。

5 最新进展

$\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光实现高重频运行是使该激光器件在光电对抗、水下通信领域得以实用化的重要条件。目前, $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光的重频运行频率还比较低,西北核技术研究所研制的 XeF 激光器运行频率最大为 1 Hz 。国外虽曾报道过泵浦源的运行频率达到 5 Hz ^[4],但并没有获得重频激光输出。获得高重频 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光的前提是光泵浦源能够高重频运行。目前,西北核技术研究所正在开展光泵浦源重频运行的研究工作,新研制的重频光泵浦源模块如图 10 所示。以聚四氟乙烯为放电基板材料



图 10 重复频率泵浦源模块

Fig. 10 The repetition rate pumping source module

的泵浦源最高运行频率已达到 90 Hz ^[16],图 11 是 50 Hz 频率下 50 次放电的放电波形包络图。但聚四氟乙烯材料存在放电烧蚀问题,不能长寿命使用。最近,西北核技术研究所已新研制了以 Al_2O_3 材料为放电基板的泵浦源,该泵浦源耐烧蚀性能良好,运行频率已达到 30 Hz 。

水下探测和水下通信希望激光线宽越窄越好,已获得的 $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ 激光光谱有 $20 \sim 30 \text{ nm}$ 的带宽(见图 4)。最近,西北核技术研究所正在开展激光线宽压缩研究工作并已获得很好的结果。利用谐振腔腔镜谱带重叠法已使激光光谱宽度压缩到 7 nm ($473.6 \sim 480.6 \text{ nm}$),如图 12(a)所示,这种方法并不损失激光输出能量。利用光栅谐振腔法已使激光线宽压缩到 1 nm (中心波长为 472.8 nm),如图 12(b)所示。

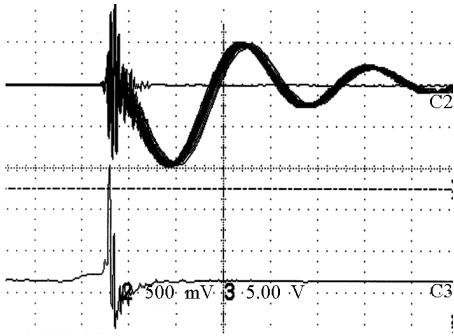


图 11 50 Hz 重频放电波形

Fig. 11 Discharge current waveforms under 50 Hz repetition rate

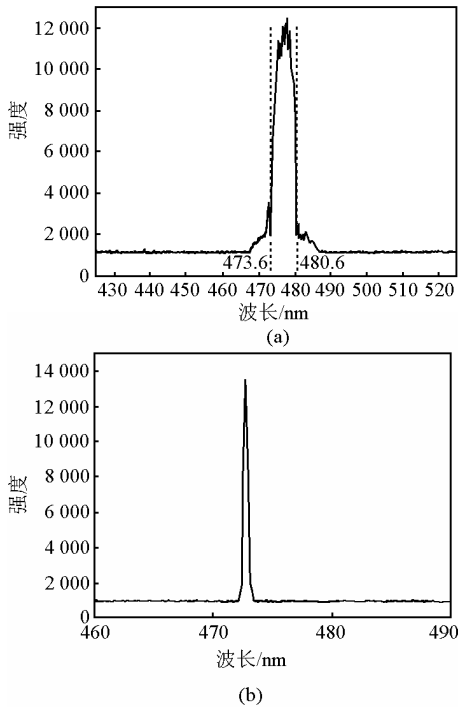


图 12 XeF(C-A) 激光光谱

Fig. 12 The spectra of the XeF(C-A) laser radiation

6 结语

从激光器件、泵浦源、供气装置和最新进展几个方面综述了西北核技术研究所光泵浦 XeF(C-A) 激光技术研究方面取得的成果。研制的 10 J 级激光器最大输出能量为 18.7 J, 总转换效率达到 50.25%, 在国际上首次实现了 XeF(C-A) 激光重频运行, 运行频率为 0.1 ~ 1 Hz; 光泵浦源最高运行频率达 90 Hz, XeF(C-A) 激光线宽已被压缩到 1 nm。

参考文献

- [1] Bivinov N K, Vinogradov I P, Mikheev L D, et al. Determination of the spectral dependences of absolute quantum yields of XeF(B, C, D) excimers in photolysis of XeF₂ [J]. Sov J Quantum Electron, 1981, 11(9): 1178 - 1181
- [2] Zuev V S, Kashnikov G N, Mamaev S B. XeF laser with optical pumping by surface discharge [J]. Sov J Quantum Electron, 1992, 22(11): 973 - 979
- [3] Sentic M L, Tcheremiskin V I, Delaporte P C. XeF(C-A) laser pumped by formed - ferrite open discharge radiation [J]. Appl Phys Lett, 1997, 70(10): 1198 - 1200
- [4] Kaecht B A, Fraser R D, Wheeler D J, et al. Optical pumping of the XeF(C-A) and iodine 1.315 μm lasers by a compact surface discharge system [J]. Opt Eng, 2003, 42: 3612 - 3621
- [5] Mikheev L, Levtschenko K, Mamaev S, et al. Direct amplification of frequency doubled femtosecond pulse from Ti:Sa laser in photochemically driven XeF(C-A) active media [A]. Proceedings of SPIE [C]. 2004, 5448: 384 - 392
- [6] Tcheremiskine V I, Sentic M L, Mikheev L D. Amplification of ultrashort laser pulses in the photolytically driven XeF(C-A) active medium [J]. Appl Phys Lett, 2002, 81: 403 - 405
- [7] Clady R, Coustillier G, Gastaud M, et al. Architecture of a blue high contrast multiterawatt ultrashort laser [J]. Appl Phys B, 2006, 82: 347 - 358
- [8] Yu Li, Liu Jingru, Hu Zhiyun, et al. Experimental study on XeF(C-A) laser pumped by surface discharge radiation [A]. Proceedings of the International Conference on LASER '97 [C]. USA: Mclean, VA, 1998. 83 - 87
- [9] 胡志云, 刘晶儒, 于力, 等. 分段表面放电光抽运 XeF(C-A) 激光器 [J]. 光学学报, 2001, 21(4): 450 - 453
- [10] 于力, 张永生, 刘晶儒, 等. 光抽运 XeF(C-A) 蓝绿激光器 [J]. 中国激光, 2001, 28(3): 205 - 208
- [11] 于力, 刘晶儒, 马连英, 等. 焦耳级光抽运 XeF 蓝绿激光器 [J]. 光学学报, 2005, 25(7): 930 - 934
- [12] Yu Li, Liu Jingru, Ma Lianying, et al. The development of a joule level of XeF(C-A) laser by optical pumping [J]. Laser and Particle Beams, 2005, 23(4): 559 - 562
- [13] Yu Li, Liu Jingru, Ma Lianying, et al. 10 J energy - level optically pumped XeF(C-A) laser with repetition mode [J]. Optics Letters, 2007, 32(9): 1087 - 1089
- [14] 于力, 刘晶儒, 胡志云, 等. 横向表面放电光泵浦源特性研究 [J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(1): 43 - 46
- [15] 易爱平, 刘晶儒, 于力, 等. 多通道沿面放电电化学特性研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 10 - 13
- [16] Yu Li, An Xiaoxia, Ma Lianying, et al. Experimental study on the surface discharge optical pumping source with high repetition mode [A]. XVII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Lasers [C]. Portugal: Lisbon, 2008

Development of optically pumped XeF(C-A) laser

Yu Li, Liu Jingru, Yi Aiping, Ma Lianying, Li Hui,
Huang Chao, An Xiaoxia, Chen Guangyu, Zhu Feng, Ye Xisheng
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[**Abstract**] The achievements of the optically pumped XeF(C-A) laser technology in Northwest Institute of Nuclear Technology have been summarized. An optically pumped XeF(C-A) laser with 0.1 ~ 1 Hz pulse-repetition mode is developed. The maximum output energy is up to 18.7 J, which corresponds to the conversion efficiency of the stored electrical energy to the laser output energy of 0.25%. To our knowledge, it is the first report on a photochemically pumped XeF(C-A) laser with repetition mode and the conversion efficiency is the highest. The structure of the optical pumping source with sectioned surface discharge and the device of the mixture gases generator are described. The latest development of the high repetition rate optical pumping source and compressing laser spectrum linewidth are discussed. The maximum pulse repetition rate of the new optical pumping source is up to 90 Hz. The XeF(C-A) laser spectrum linewidth is compressed less than 1 nm.

[**Key words**] XeF(C-A) laser; optical pumping; blue-green laser; repetition rate; compressing linewidth

(上接 37 页)

Recycling indium and tin by treating ITO waste with sulphuric acid and hydrochloric acid leaching-sulfide precipitation

Wang Shukai

(Honghe Zinc Industrial Trade Co., Ltd., Gejiu, Yunnan 661011, China)

[**Abstract**] It's difficult to leach ITO feed solution and effectively recycle indium and tin. The problems can be solved by treating ITO waste with sulphuric acid and hydrochloric acid leaching-sulfide precipitation.

[**Key words**] ITO; waste; indium; tin; sulphuric acid and hydrochloric acid leaching-sulfide precipitation