

# 高功率微片激光器及其在 LIBS 中的应用

邓奔 王杰 姜培培 吴波 沈永行

(浙江大学光电信息工程学系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 利用  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  键合晶体分别研究了被动调 Q 的单体和半外腔结构激光器的高功率短脉冲激光特性,发现半外腔结构的被动调 Q 激光器具有产生脉冲宽度小于 1 ns、单脉冲能量达 1 mJ、峰值功率超过 1 MW 的潜力,远远优于单体激光器可以获得的单脉冲激光能量和激光峰值功率。利用所研制的半外腔结构被动调 Q 激光器,并结合自行研制的高分辨率光纤光谱仪,开展了激光诱导击穿光谱(LIBS)技术研究,针对标准铁合金样品和溶液中的 Pb 重金属离子,得到了较好的定性分析结果和定量关系曲线。

**关键词** 激光器;高功率;光纤光谱仪;激光诱导击穿光谱

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1102005

## High Peak Power Microchip Laser and its LIBS Application

Deng Ben Wang Jie Jiang Peipei Wu Bo Shen Yonghang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** The short pulse laser characteristics of  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  diffuse-bonded single piece and the semi-external cavity passively Q-switched lasers are investigated respectively. It is found that the semi-external cavity structured passively Q-switched laser can emit laser pulses with pulse duration less than 1 ns, single pulse energy greater than 1 mJ and peak power higher than 1 MW, much better than the performance of the single piece laser. Using the developed laser and a home-made high resolution fiber spectrometer, a compact LIBS system is set up. The performance of the LIBS system is evaluated in the cases of standard iron alloy samples and the Pb contained liquid samples. Qualitative analysis result and quantitative relationship curve are obtained.

**Key words** lasers; high peak power; fiber spectrometer; laser induced breakdown spectroscopy

**OCIS codes** 140.3538; 140.3440; 300.6320; 300.6365

## 1 引言

激光诱导击穿光谱(LIBS)技术是指将高能脉冲激光束聚焦到样品上产生激光诱导等离子体,利用等离子体发射光谱进行元素分析的一种技术,具有实时快速、样品损失少、可远程监测、适用形态广泛、能多种元素同时分析等优点,正逐渐发展成为一种极具应用前景的元素检测分析技术,并且已部分应用于工业检测、环境监测、生物技术、文物保护、药理学、表面分析等重要领域<sup>[1-5]</sup>。在 LIBS 技术所涉及的各种器件中,高功率的激光器和高分辨率的

光谱仪是最为关键的二个核心部件。一般的商用 LIBS 系统常采用高能量的灯抽运固体激光器作为抽运源,因其具有脉冲能量大(一般可以大于 100 mJ)、峰值功率高(大于 1 MW)的特点,聚焦到待测样品表面时易于产生较强的等离子体<sup>[6]</sup>。但是灯泵系统存在较为严重的工作寿命和激光脉冲稳定性问题。由于激光器的脉冲能量和脉冲特性都会影响等离子体的产生特性<sup>[7]</sup>,因此激光脉冲的不稳定将在很大程度上影响 LIBS 系统的测量精度,这实际上也在很大程度上制约了 LIBS 系统从定性分析走向半定

收稿日期: 2014-05-07; 收到修改稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家 863 计划(2009AA063006)

作者简介: 邓奔(1989-),男,硕士研究生,主要从事固体激光器和激光诱导击穿光谱技术等方面的研究。

E-mail: dengben@zju.edu.cn

导师简介: 沈永行(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、中红外光参量振荡器、光纤传感、光谱检测技术等方面的研究。E-mail: phsysh@zju.edu.cn

量分析并逐渐走向定量分析。正是基于这一点,研究制作一个结构紧凑、激光峰值功率高、脉冲稳定性好、适用于 LIBS 分析的新型激光器就具有重要的实际应用价值。与激光器相对应,高分辨率的光谱仪也是 LIBS 系统中的关键核心器件。由于等离子体发射诱导光谱的持续时间短,所涉及的光谱仪必须是一个能并行捕获单脉冲光谱的并行式工作的光谱仪。显然,基于电荷耦合器件(CCD)器件的光纤光谱仪是一个较为合适的选择。其主要的性能指标应该满足光信号探测灵敏度和光谱分辨率等方面的要求。本文主要介绍 LIBS 应用相关的半外腔结构的微片激光器研制以及高分辨率 CCD 光纤光谱仪的设计制作方面的工作,并简单介绍利用所研制系统开展 LIBS 测量方面的部分结果。

## 2 半外腔结构的被动调 Q 微片激光器

利用  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  键合晶体,通过在晶体的两个平行表面上直接镀制激光反射膜制作单体式微片激光器的工作早在 20 世纪 90 年代就已经有报道<sup>[8-9]</sup>,通过将抽运激光以合适尺寸聚焦到键合晶体中间,利用晶体本身的热透镜效应,可以产生重频达到数万赫兹的高重频短脉冲激光输出,以此获得峰值功率高、结构紧凑的微型激光器<sup>[10-12]</sup>。但是,一般情况下该类激光器的单脉冲激光能量仅限于  $10\ \mu\text{J}$  的水平。2000 年,John<sup>[13]</sup>研究了一种脉宽达 218 ps、单脉冲能量可  $250\ \mu\text{J}$  的亚纳秒单体激光器,并指出了该激光器在 LIBS 领域的潜在应用。在国内,Miao 等<sup>[14]</sup>研究了在  $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}:\text{YAG}$  扩散键合的激光器中获得重复频率为 16.3 kHz、脉宽为 6 ns 的稳定脉冲输出,激光单脉冲能量达到  $38.5\ \mu\text{J}$ ,但是由于脉宽较大,激光峰值功率并不是特别高。目前,国内外已经有少量利用微片激光器开展 LIBS 研究的一些工作介绍<sup>[15-17]</sup>。但这类激光器的脉冲能量普遍较低,激光聚焦到样品表面时,产生的等离子体相对而言强度较小,利用其产生的激光诱导光谱信号太弱,很难实现高信噪比的测量。2008 年,Sakai 等<sup>[18]</sup>设计的  $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}:\text{YAG}$  微片激光器获得了  $0.69\ \text{mJ}$ ,  $580\ \text{ps}$  的单模激光输出,激光峰值功率超过  $1\ \text{MW}$ ,所报道的微片激光器结构为单体式。2013 年,Bhandari 等<sup>[19]</sup>报道了利用半外腔结构的被动调 Q 微片激光器实现紫外高功率短脉冲激光输出的研究,其在  $1064\ \text{nm}$  波段的基频光峰值功率达到  $13\ \text{MW}$ 。但是,该激光器中增益介质与自饱和吸收体为分离结构。为了进一步探索微片激光器用

于 LIBS 系统的可行性,系统地开展了高功率半导体激光器抽运条件下的微片激光器研究,分别采用单体结构和半外腔结构,得到了不同抽运条件下的短脉冲激光输出,测试了相关激光输出特性。

所涉的微片激光器结构如图 1 所示,其中图 1(a)为单体式腔结构,图 1(b)为半外腔结构。所用的抽运激光器为 LIMO 公司的光纤输出半导体激光器,输出光纤直径为  $400\ \mu\text{m}$ ,激光波长  $808\ \text{nm}$ ,光谱带宽  $3\ \text{nm}$ ,最大功率为  $60\ \text{W}$ 。通过一个光束耦合系统将抽运激光耦合到键合晶体之上。键合晶体尺寸为  $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ ,其中  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  部分长度约  $4\ \text{mm}$ , $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  部分长度约  $2\ \text{mm}$ 。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  中  $\text{Nd}$  离子的掺杂离子数分数约  $1\%$ , $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体对于  $1064\ \text{nm}$  的初始透射率为  $65\%$ 。对于单体式结构的  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  键合晶体表面, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  一侧镀有  $808\ \text{nm}$  高透、 $1064\ \text{nm}$  全反的光学膜, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  一侧  $1064\ \text{nm}$  的透射率为  $5\%$ 。对于半外腔结构, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  一侧为  $808\ \text{nm}$  高透、 $1064\ \text{nm}$  全反的光学膜, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  一侧对  $1064\ \text{nm}$  增透,反射率小于  $0.2\%$ 。半外腔结构中采用的外腔反射镜为平凹镜,曲率半径为  $750\ \text{mm}$ ,对  $1064\ \text{nm}$  的透射率为  $15\%$ ,键合晶体与平凹镜之间的距离为  $3\ \text{mm}$ 。键合晶体由铜膜包覆后置于金属基座上,采用金属基座直接表面散热方式工作。

实验中,所用抽运方式为脉冲抽运,调制脉冲重复频率为  $10\ \text{Hz}$ ,脉冲抽运宽度为  $900\ \mu\text{s}$ 。半导体激光器抽运源在  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  键合晶体上的光斑尺寸可以通过抽运激光的位置离焦加以调节,通过逐渐增加抽运光斑尺寸,可以发现微片激光器的激光阈值增加,但同时可获得的最大单脉冲输出能量逐渐增加。对于单体型结构,可获得的最大单脉冲能量

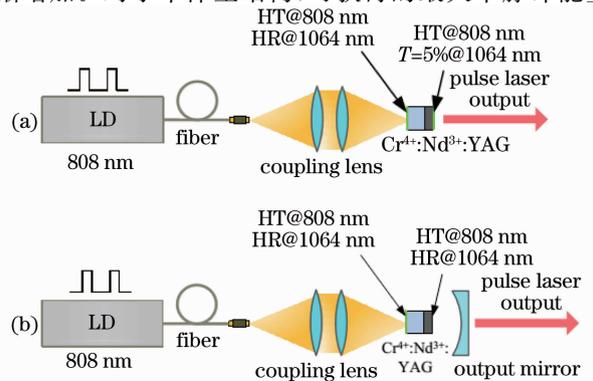


图 1 (a) 单体式腔结构和 (b) 半外腔结构的微片激光器  
Fig. 1 (a) Structure of single piece laser and (b) semi-external cavity microchip laser

约 30  $\mu\text{J}$ , 超过该脉冲能量时键合晶体表面基本上都发生损坏。这一现象经过多块晶体反复实验确认, 分析认为是由于该种条件下晶体热透镜效应导致的激光腔模过小, 导致晶体表面激光功率密度过高, 并最终超过激光膜的损伤阈值导致损坏。相比于文献 [18], 可实现峰值功率小的主要原因是晶体的镀膜质量可能有较大差距。对于半外腔结构微片激光器, 在抽运激光的光斑尺寸为 600  $\mu\text{m}$  条件下, 当不断增加激光抽运功率, 激光输出功率持续上升, 对应的激光单脉冲能量相应增大。在激光二极管(LD)抽运脉宽为 900  $\mu\text{s}$  条件下, 输出的 1064 nm 激光能量与 LD 抽运功率之间的关系如图 2 所示。由图 2 可知, 在抽运功率为 43 W 时, 输出脉冲激光的单脉冲能量已达到 1 mJ。测试输出激光脉冲的脉冲波形和光谱, 可以发现脉宽约 0.6 ns, 光谱宽度约 0.03 nm, 相应的脉冲波形和光谱形状见图 3 和图 4。

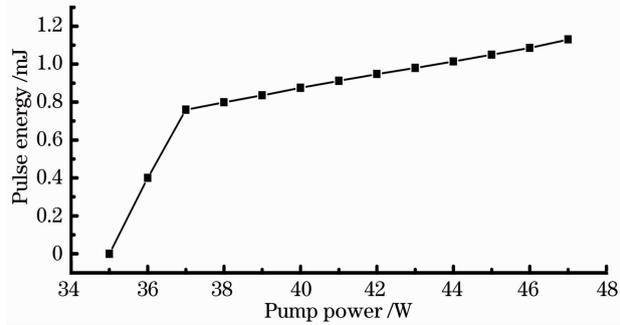


图 2 半外腔微片激光器输出单脉冲能量与 LD 抽运功率的关系  
Fig.2 Relationship of the single-pulse energy in the semi-external cavity microchip laser and the pump power of LD

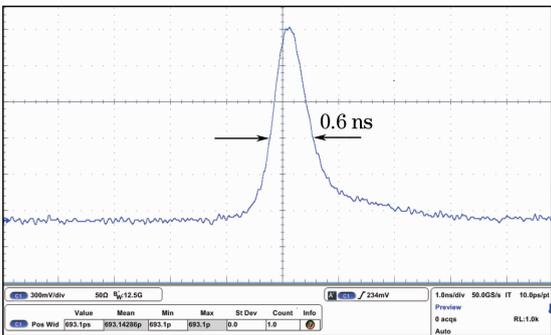


图 3 半外腔微片激光器输出的激光单脉冲  
Fig. 3 Single pulse pattern of the semi-external cavity microchip laser output

分析半外腔结构的键合晶体激光器能够实现更大激光脉冲能量输出的主要原因在于半外腔结构条件下, 激光腔模的尺寸可以明显大于单体结构的微片激光器。对输出激光束发散特性的测试表明, 在

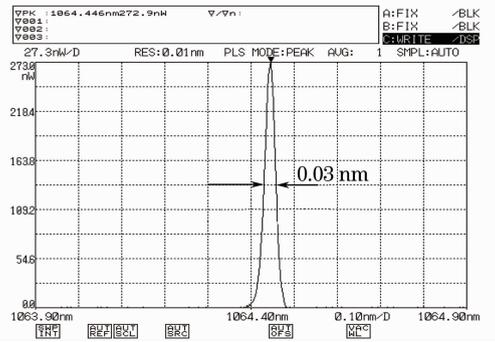


图 4 半外腔微片激光器脉冲激光输出光谱  
Fig. 4 Laser spectrum of the semi-external cavity microchip laser

当前实验条件下, 键合晶体上的激光腔模尺寸达到 560  $\mu\text{m}$ , 远远大于单体结构中的 100  $\mu\text{m}$  左右。因此, 微片激光器中的键合激光介质可以持续稳定工作。此外, 腔模尺寸与抽运光斑尺寸基本一致, 也有利于获得较大的激光能量输出。

对于脉宽 0.6 ns、单脉冲能量 1 mJ 的微片激光器, 其峰值功率超过 1 MW。将该输出激光通过光学耦合系统聚焦到待测样品上, 已经可以产生较强的等离子体光谱。结合后续介绍的高分辨率光纤光谱仪和光谱采集系统, 可以得到信噪比较高的激光诱导等离子体发射光谱, 并用于物质成份分析。

### 3 基于线阵 CCD 器件的高分辨率微型光纤光谱仪

高分辨率的光谱仪是 LIBS 系统的另一个重要组成部件。自行研制的光纤光谱仪使用交叉 Czerny-Turner 结构的光学平台, 具有结构紧凑、空间利用率高、像差小、加工和装调方便的优点<sup>[20~22]</sup>, 其结构原理如图 5 所示。其工作原理为: 光源发射的光经光纤传导进入狭缝 S1, 然后经凹面反射镜 M1 准直, 平行光照射到闪耀光栅 G 上, 经光栅 G

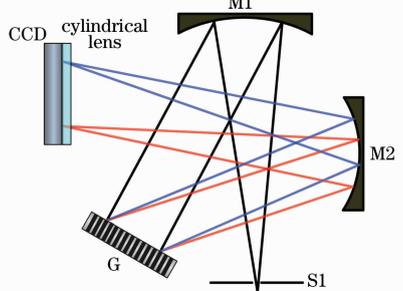


图 5 交叉 Czerny-Turner 结构的光谱仪光学平台  
Fig.5 Optical table of the cross Czerny-Turner structured spectrometer

分光后由凹面反射镜 M2 将待测光谱聚焦成像到线阵 CCD 感光面上。CCD 阵列将光谱信号转化为相应的电脉冲信号,由后续电路处理放大后经模/数(A/D)转换成数字信号<sup>[23]</sup>,通过 USB 口与计算机相连,所测量的光谱数据由光谱分析软件处理。

为保证所研制的光纤光谱仪能够满足 LIBS 光谱的测试要求,光谱仪的技术指标既要满足光谱分辨率的要求(优于 0.1 nm),又要覆盖合适的光谱范围,同时还要保证光谱仪具有足够好的灵敏度和信噪比。为此,特别将两个光学反射镜 M1 和 M2 的曲率半径分别设计为 190 mm 和 210 mm,光谱仪入射狭缝 S1 的宽度为 16 μm,并采用 1800 lp 的平面闪耀光栅。所用的 CCD 探测器为 SONY 公司生产的 ILX554B 线阵 CCD,其有效像元数为 2048 个。据此参数设计、制作的光谱仪实际光谱覆盖范围 340~440 nm,光谱分辨率为 0.1 nm。这样的光谱覆盖范围和光谱分辨率,已经能够基本满足对多种元素成份的测试要求。所研制的光谱仪样机照片如图 6 所示。



图 6 所研制的高分辨率光纤光谱仪样机

Fig. 6 Photo of the high resolution fiber spectrometer prototype

## 4 LIBS 实验测试及结果分析

### 4.1 实验系统

图 7 为 LIBS 实验系统的结构原理示意图。所研制的半外腔结构的微片激光器和光纤光谱仪分别作为激光激抽运和光谱检测部件,激光束经反射镜

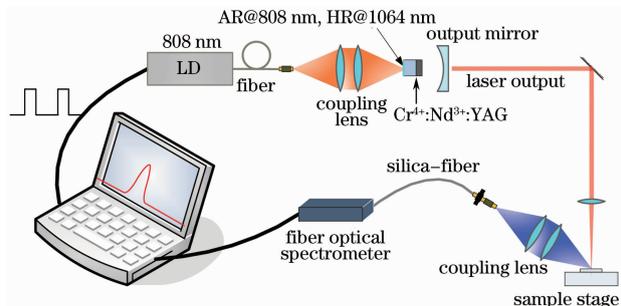


图 7 LIBS 实验系统原理示意图

Fig. 7 Diagram of LIBS experimental system

转折光路后,经过一焦距为 100 mm 的透镜聚焦在样品表面,形成大小约为 0.1 mm 的光斑。激发产生的等离子体光谱信号,经过一对焦距为 50 mm、口径为 25 mm 的 1:1 耦合透镜组传输至石英光纤,由光纤传导进入光谱仪,并通过分析软件进行光谱处理和分析。为了保证样品上的采样点无重复,实验中待测样品放置于一个二维平移台上,使能不断调整采样点位置,以获得较为一致的测量结果。

为了获得高分辨率的 LIBS 光谱,实验中需要优化设置激光脉冲的激发与光谱采集的延时同步时间。一般固体样品中的等离子体特征谱线大约在等离子体出现后 4~6 μs 最为明显,实验中通过便携式计算机程序,同步控制抽运激光器的脉冲启动和光谱采集信号。通过精确设置抽运激光器的启动时间和光谱仪中 CCD 的感光触发时间,可以优化控制两者的延时同步(约 6 μs)。通过比较采集到的 LIBS 光谱强度,可以优化最佳的时间同步延时量。

### 4.2 实验结果分析

#### 4.2.1 固体金属样品定性分析

对两块标准铁合金样品进行了光谱分析,样品 1 为生铁,质量分数:1.6% Mn、0.1% V;样品 2,为不锈钢,成分:17%~18% Cr、2% Mn、2% Mo、9% Ni。

通过对比分析,并查询美国国家标准技术研究所(NIST)原子发射光谱数据库<sup>[24]</sup>,可以找出两个样品中的元素对应的特征谱线,然后通过分析所测谱线可评估所搭建的 LIBS 系统的性能。利用实验搭建的 LIBS 系统对两个样品所测的谱线如图 8 所示。由图 8 可知,两个样品中均含有丰富的 Fe 谱线和 Mn 特征谱线,样品 2 中更含有丰富的 Ni、Cr 谱线。通过 Mn 的 403.08、403.31、403.45 nm 三条特征谱线可以看出,光谱可以分辨出 0.1 nm 的谱线来,表明光谱仪具有足够的分辨率,能分辨出大部分元素的特征谱线。

#### 4.2.2 液体中 Pb 离子的定量分析

由于激光诱导等离子体光谱的产生的机理很复杂,其光谱强度受系统的参数影响很大,直接进行定量分析存在较大困难。为了提高分析的准确性和稳定性,实验采用内标法,对待测元素的光谱强度用基体元素的光谱强度做归一化处理,即以待测元素与内标元素的谱线强度比作为纵坐标,以待测元素的浓度作为横坐标,作定量曲线。定量分析关系函数可表示为<sup>[25]</sup>

$$I = aC^b, \quad (1)$$

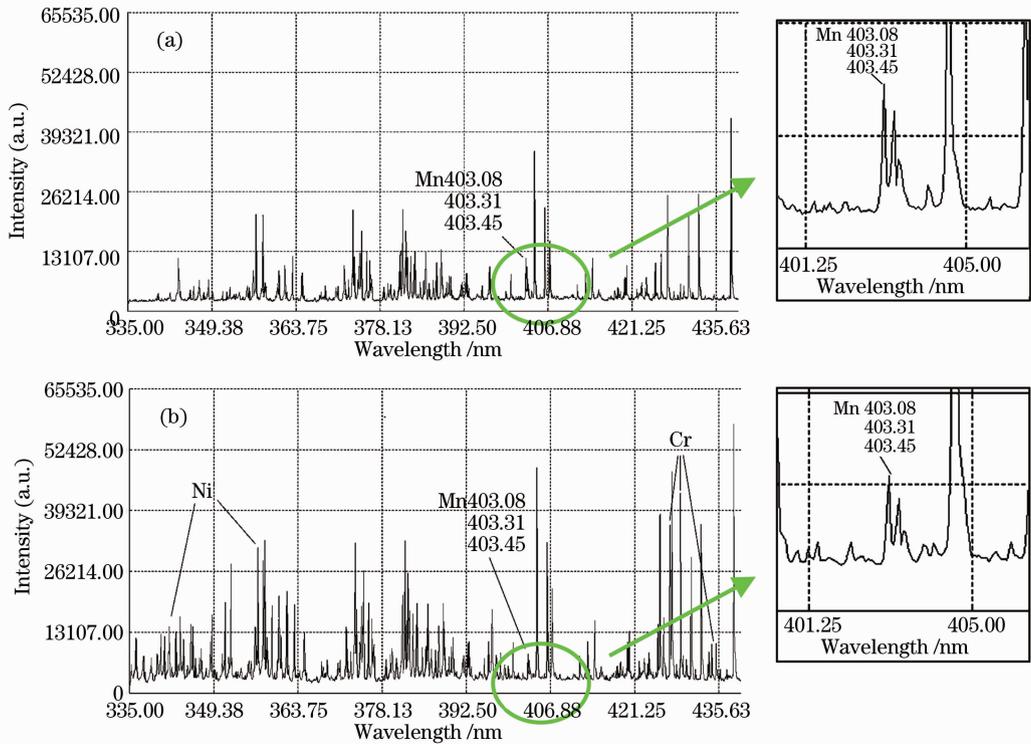


图 8 被检测样品的 LIBS 光谱。(a)样品 1；(b)样品 2

Fig. 8 LIBS spectra of the samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

式中  $I$  是被测元素与内标元素的谱线强度比,  $C$  是被测元素的浓度,  $a$  是常数,  $b$  是自吸系数。

实验选择测量的元素是 Pb, 重金属溶液是  $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$  溶液, 采用石墨基底富集的方式。液体实验采用富集在石墨基底上的方式进行, 这能避免激光直接打在液体上时存在的击穿阈值高、光谱淬灭严重、等离子体寿命短、液体溅射等缺点, 这种方法能用较小的成本、简单的装置, 较大地提高检测灵敏度。在选择内标谱线时, 由于石墨基底本身的特征谱线并不明显, 而且基底的光谱特征在不同位置的波动性很大, 所以无法选用基底的特征谱线作为内标谱线。为此, 在实验中选择 Pb 405.78 nm 谱线作为分析线, 选择  $\text{MnCl}_2$  溶液作内标物, 用 Mn 403.08 nm 特征谱线作为内标谱线。

石墨基底采用圆形石墨凹槽, 直径为 20 mm, 深度为 3 mm, 凹槽底部表面平整均匀。实验前首先配成含 Pb 质量浓度分别为  $0.5 \times 10^{-6}$ 、 $1 \times 10^{-6}$ 、 $2 \times 10^{-6}$ 、 $5 \times 10^{-6}$ 、 $10 \times 10^{-6}$ 、 $15 \times 10^{-6}$ 、 $20 \times 10^{-6}$  g/mL 的溶液, 并分别加入相同含量、 $5 \times 10^{-6}$  的  $\text{MnCl}_2$  溶液作为内标, 均匀混合后各量取出 1 mL, 均匀滴在石墨圆槽中, 并放在烘箱中烘干, 取出后即可进行实验。由于自吸系数  $b \approx 1$ , 所以定量关系将呈线性关系<sup>[25]</sup>。

通过测得的多组强度比 ( $I$ ) 和浓度 ( $C$ ) 的数

据, 可以拟合出  $I$ - $C$  曲线, 如图 9 所示。

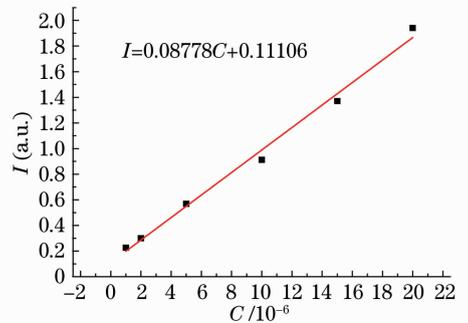


图 9 经过拟合得到的 Pb 含量  $I$ - $C$  曲线

Fig. 9 Fitted  $I$ - $C$  curve of Pb concentration

需要说明的是, 该拟合曲线中包含一个常数项 0.11106, 这是由于光谱仪的背景光始终存在, 当浓度为 0 时光谱强度并不是 0, 所以多出了一个常数项, 但这并不影响定量分析的准确性。

## 5 结 论

研究了利用  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  键合晶体的半外腔结构被动调 Q 微片激光器, 针对激光膜系损伤阈值较低的问题, 利用半外腔结构稳定产生了超过 1 mJ 的脉冲冲激光输出能量, 其峰值功率远高于单体结构的微片激光器, 适用于作为 LIBS 系统

的激光激励源。结合自行研制的高分辨率微型光纤光谱仪和光谱采集系统,搭建了一套 LIBS 测试系统,对标准铁合金样品和含重金属 Pb 的液态样品,进行了激光诱导等离子体光谱实验,得到了较好的定性分析结果,并给出了较为稳定的定量分析关系曲线,展示了所研制系统在样品元素成分分析中的良好前景。

参 考 文 献

1 Rusak D A, Castle B C, Smith B W, *et al.*. Fundamentals and applications of laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 1997, 27(4): 257-290.

2 Sun Lanxiang, Yu Haibin, Cong Zhibo, *et al.*. Quantitative analysis of Mn and Si of steels by laser induced breakdown spectroscopy combined with neural networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2757-2765.

孙兰香, 于海斌, 丛智博, 等. 激光诱导击穿光谱技术结合神经网络定量分析钢中的 Mn 和 Si[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2757-2765.

3 Xu Yuan, Yao Mingyin, Liu Muhua, *et al.*. Laser induced breakdown spectroscopy of chromium in water solution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1230002.

徐 媛, 姚明印, 刘木华, 等. 水溶液中铬元素的激光诱导击穿光谱研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1230002.

4 Chen Xinglong, Dong Fengzhong, Tao Guoqiang, *et al.*. Fast lithology identification by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1215001.

陈兴龙, 董凤忠, 陶国强, 等. 激光诱导击穿光谱在地质录井岩性快速识别中的应用[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1215001.

5 Miziolek A W, Palleschi V, Schechter I. *Laser Induced Breakdown Spectroscopy*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

6 Fang Quanyu, Yan Jun. *Atomic Structure, Collision and Spectrum Theory*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.

方泉玉, 颜军等. 原子结构、碰撞与光谱理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

7 Yuan Dongqing, Zhou Ming, Liu Changlong, *et al.*. The theory and effect factors of laser breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(9): 2019-2023.

袁冬青, 周 明, 刘长隆, 等. 激光感生击穿光谱技术 (LIBS) 的原理及影响因素[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(9): 2019-2023.

8 Zhou S, Li S, Lee K K, *et al.*. Monolithic self-Q-switched Cr, Nd:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(7): 511-512.

9 Li S, Lee K K, Zhou S, *et al.*. Self-Q-switched diode-end-pumped Cr,Nd:YAG laser with polarized output[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(3): 203-204.

10 Zhou Tao, Chen Jun, Wu Xiaodong. LD pumped Cr<sup>4+</sup>:Nd<sup>3+</sup>:YAG monolithic microchip self Q-switched laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002,14(06): 841-844.

周 涛, 陈 军, 吴晓冬. 二极管泵浦双掺杂 YAG 微片自调 Q 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(6): 841-844.

11 Zhou Tao, Chen Jun. Characteristics and analysis of laser diode

end-pumped Cr<sup>4+</sup>:Nd<sup>3+</sup>:YAG microchip laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 455-458.

周 涛, 陈 军. 激光二极管端面连续抽运的 Cr<sup>4+</sup>:Nd<sup>3+</sup>:YAG 微片激光器输出特性研究[J]. *光学学报*, 2003, 23(4): 455-458.

12 Lei H, Gong M, Ping Y, *et al.*. Repetition rate continuously controllable passively Q-switched Nd:YAG bonded microchip laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(8): 572-575.

13 John J Zayhowski. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications[J]. *J Alloys and Compounds*, 2000, 303: 393-400.

14 Miao J, Wang B, Peng J, *et al.*. Efficient diode-pumped passively Q-switched laser with Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(1): 137-141.

15 Freedman A, Iannarilli Jr F J, Wormhoudt J C. Aluminum alloy analysis using microchip-laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2005, 60(7): 1076-1082.

16 Lopez-Moreno C, Smith B W, Gornushkin I B, *et al.*. Quantitative analysis of low-alloy steel by microchip laser induced breakdown spectroscopy[J]. *J Analytical Atomic Spectrometry*, 2005, 20(6): 552-556.

17 Sha Pingsheng. *Design and Research of Microchip Laser Based Laser Induced Breakdown Spectroscopy System*[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.

沙平生. 基于微晶片激光的诱导击穿光谱系统设计与研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.

18 Sakai H, Kan H, Taira T. >1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:YAG microchip laser [J]. *Opt Express*, 2008, 16(24): 19891-19899.

19 Bhandari R, Taira T. Palm-top size megawatt peak power ultraviolet microlaser[J]. *Opt Eng*, 2013, 52(7): 076102.

20 Wang Han, Li Shuifeng, Liu Xiuying. Optical structure of miniature spectrometer[J]. *J Applied Optics*, 2008, 29(2): 230-233.

王 哈, 李水峰, 刘秀英. 微型光谱仪光学结构研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(2): 230-233.

21 Wu Yan, Tang Yi, Ni Guoqiang, *et al.*. FUV imaging spectrometer based on crossed Czerny-Turner structure [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(3): 125-129.

吴 雁, 唐 义, 倪国强, 等. 一种交叉的切尔尼-特纳型远紫外成像光谱仪[J]. *光电工程*, 2009, 36(3): 125-129.

22 Rui Chuangqing. *Study and Aberration Analysis on the Optical System of Mini-Fiber-Spectrometers* [D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2005.

芮传庆. 微小型光纤光栅光谱仪的光学系统研究及像差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

23 Jiang Peipei, Qiu Yanqing, Fu Zhihui, *et al.*. DSP and FPGA-based multi-channel fiber-optic spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6):944-948.

姜培培, 裘燕青, 傅志辉, 等. 基于 DSP 和 FPGA 的多路型光纤光谱仪系统[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 944-948.

24 Sansonetti J E, Martin W C. *Handbook of basic atomic spectroscopic data*[J]. *J Physical and Chemical Reference Data*, 2005, 34(4): 1559-2259.

25 Zheng Guojing, Ji Zihua, Yu Xing. *Atomic Emission Spectrum Analysis Technology and Application*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

郑国经, 计子华, 余 兴. 原子发射光谱分析技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.