



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112098039 B

(45) 授权公告日 2021.06.18

(21) 申请号 202010933814.6

(22) 申请日 2020.09.08

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112098039 A

(43) 申请公布日 2020.12.18

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 苑朝凯 姜宗林

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390

代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.  
G01M 9/06 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101413887 A, 2009.04.22

CN 110095248 A, 2019.08.06

CN 106949850 A, 2017.07.14

CN 110160740 A, 2019.08.23

CN 201382849 Y, 2010.01.13

CN 1598494 A, 2005.03.23

DE 3906118 A1, 1990.08.30

IT 1155284 B, 1987.01.28

F.D.Bloss等.Gladstone-Dale常数的一种新解法.《地质地球化学》.1985,

Fengqin Huang等.Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing.《Optics Communications》.2019,

审查员 冯玮

权利要求书1页 说明书5页 附图2页

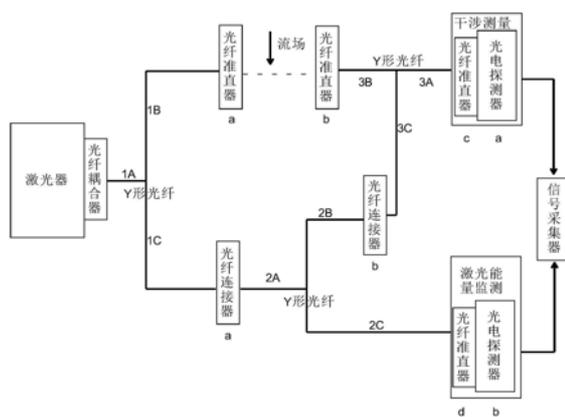
(54) 发明名称

一种高超声速流场脉动密度测量系统及测量方法

(57) 摘要

本发明公开了一种高超声速流场脉动密度测量系统及测量方法,激光经Y形光纤1A、1C、2A、2C传输,输出端通过光纤准直器d将激光对准光电探测器b,对激光器输出激光强度进行监测;激光经Y形光纤1A、1B传输,输出端的激光信号进入流场测试区;另一侧光纤准直器b收集激光信号后再次耦合经Y形光纤3B、3A传输构成干涉的测量光路;激光经Y形光纤1A、1C、2A、2B、3C、3A传输,构成干涉的参考光路,测量光与参考光相遇后产生干涉,Y形光纤3A输出端通过光纤准直器c将激光对准光电探测器a,对干涉信号进行测量。

本发明系统测量结果与脉动密度直接相关;灵敏度高;抗干扰能力强;结构紧凑、调节简便,激光光源利用率高;可实现上百兆赫兹的响应频率。



CN 112098039 B

1. 一种高超声速流场脉动密度测量系统,其特征在于,包括激光能量监测系统、干涉测量系统,

所述激光能量监测系统中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1C和光纤连接器a连接,光纤连接器a依次通过Y形光纤2A、Y形光纤2C和激光能量监测组件连接;

所述干涉测量系统包括干涉的参考光路和干涉的测量光路,

所述干涉的测量光路中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1B和光纤准直器a连接,光纤准直器a和光纤准直器b放置于需要测量流场的两侧,光纤准直器b通过Y形光纤3B、Y形光纤3A和干涉测量组件连接;

所述干涉的参考光路中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1C和光纤连接器a连接,光纤连接器a通过Y形光纤2A、Y形光纤2B和光纤连接器b连接,光纤连接器b通过Y形光纤3C、Y形光纤3A和干涉测量组件连接;

所述激光能量监测组件为光纤准直器d和光电探测器b组成的结构,所述干涉测量组件为光纤准直器c和光电探测器a组成的结构,光电探测器a和光电探测器b分别和信号采集器连接,通过信号采集器采集信号;

所述光纤准直器a和光纤准直器b之间设置标定装置,脉动密度测量范围采用标定装置进行标定,所述标定装置包括玻璃压环、标定管、石英玻璃、压力/温度传感器、真空泵,所述标定管的两端分别设置有玻璃压环和石英玻璃,标定管的中部间隔一定位置处分别设置有压力/温度传感器和真空泵,压力/温度传感器和真空泵均沿着垂直于标定管轴线方向排布设置。

2. 根据权利要求1所述一种高超声速流场脉动密度测量系统,其特征在于,所述Y形光纤的一端设置为一根传导光芯,Y形光纤的另一端设置为两根光芯并排放置,通过Y形光纤将光信号进行分路或复合。

3. 根据权利要求1或2所述一种高超声速流场脉动密度测量系统,其特征在于,所述Y形光纤设为3根,分别通过阿拉伯数字1、2、3进行标注,其三个端口分别标注为A、B、C。

4. 根据权利要求1所述一种高超声速流场脉动密度测量系统,其特征在于,所述激光器采用氦氖激光器,在输出端经光纤耦合器将激光束耦合进入Y形光纤中。

5. 一种高超声速流场脉动密度测量方法,采用1-4任意一项所述一种高超声速流场脉动密度测量系统,其特征在于,具体包括如下步骤:

激光能量监测:激光经Y形光纤1A、Y形光纤1C、Y形光纤2A、Y形光纤2C传输,输出端连接光纤准直器d和光电探测器b,光纤准直器d将激光对准光电探测器b,对激光器输出激光强度进行监测;

干涉测量:

激光经Y形光纤1A、Y形光纤1B传输,输出端连接光纤准直器a,光纤准直器a和光纤准直器b放置于需要测量的流场两侧,激光信号进入流场测试区;在另一侧光纤准直器b收集激光信号后再次耦合进入Y形光纤,经Y形光纤3B、Y形光纤3A传输,构成干涉的测量光路;

激光经Y形光纤1A、Y形光纤1C、Y形光纤2A、Y形光纤2B、Y形光纤3C、Y形光纤3A传输,构成干涉的参考光路;

Y形光纤3A输出端连接光纤准直器c和光电探测器a,测量光与参考光相遇后产生干涉,光纤准直器c将激光对准光电探测器a,对干涉信号进行测量。

## 一种高超声速流场脉动密度测量系统及测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于高超声速风洞中测量设备技术领域,具体涉及一种高超声速流场脉动密度测量系统及测量方法。

### 背景技术

[0002] 高超声速脉动特征是衡量风洞流场动态品质的重要参数,同时是研究湍流模型和转捩机理的关键参数。亚声速风洞中常用热线风速仪测量脉动速度,由于热线强度的限制及其对流场引入的干扰而无法在高超声速风洞中应用。高超声速风洞中主要测量脉动压力或脉动密度。脉动压力的测量方法受传感器响应频率限制无法覆盖所有重要的频带,并且流场总温较高时,传感器难以满足热载荷和冲击载荷的要求。已有的脉动密度测量方法,如纹影仪、激光聚焦差分干涉仪,其测量结果为密度梯度,需要经过复杂的换算才能得到脉动密度变化。因此,如何研发一种高超声速流场脉动密度测量方法,具有重要的现实意义。

### 发明内容

[0003] 针对现有技术中存在的问题,本发明针对高超声速流场的测量需求提出了一种高超声速流场脉动密度测量系统,具体涉及一种基于激光干涉的脉动密度测量方法,测量结果与脉动密度直接相关,且具有非接触测量、高响应频率、高灵敏度和抗干扰能力强等特点。

[0004] 本发明采取的技术方案为:

[0005] 一种高超声速流场脉动密度测量系统,包括激光能量监测系统、干涉测量系统,

[0006] 更为具体的是,包括激光器、光纤耦合器、Y形光纤、光纤连接器、光纤准直器、光电探测器及信号采集器,所述激光器和光纤耦合器连接,

[0007] 所述激光能量监测系统中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1C和光纤连接器a连接,光纤连接器a依次通过Y形光纤2A、Y形光纤2C和激光能量监测组件连接;

[0008] 所述干涉测量系统包括干涉的参考光路和干涉的测量光路,

[0009] 所述干涉的测量光路中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1B和光纤准直器a连接,光纤准直器a和光纤准直器b放置于需要测量流场的两侧,光纤准直器b通过Y形光纤3B、Y形光纤3A和干涉测量组件连接;

[0010] 所述干涉的参考光路中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1C和光纤连接器a连接,光纤连接器a通过Y形光纤2A、Y形光纤2B和光纤连接器b连接,光纤连接器b通过Y形光纤3C、Y形光纤3A和干涉测量组件连接;

[0011] 所述激光能量监测组件为光纤准直器d和光电探测器b组成的结构,所述干涉测量组件为光纤准直器c和光电探测器a组成的结构,光电探测器a和光电探测器b分别和信号采集器连接,通过信号采集器采集信号。

[0012] 进一步的,所述Y形光纤的一端设置为一根传导光芯,Y形光纤的另一端设置为两根光芯并排放置,通过Y形光纤将光信号进行分路或复合。

[0013] 进一步的,所述Y形光纤设为3根,分别通过阿拉伯数字1、2、3进行标注,其三个端口分别标注为A、B、C。

[0014] 进一步的,所述激光器采用氦氖激光器,在输出端经光纤耦合器将激光束耦合进入Y形光纤中。

[0015] 进一步的,所述光纤准直器a和光纤准直器b之间设置标定装置,脉动密度测量范围采用标定装置进行标定,所述标定装置包括玻璃压环、标定管、石英玻璃、压力/温度传感器、真空泵,所述标定管的两端分别设置有玻璃压环和石英玻璃,标定管的中部间隔一定位置处分别设置有压力/温度传感器和真空泵,压力/温度传感器和真空泵均沿着垂直于标定管轴线方向排布设置。

[0016] 一种高超声速流场脉动密度测量方法,采用所述一种高超声速流场脉动密度测量系统,具体包括如下步骤:

[0017] 激光能量监测:激光经Y形光纤1A、Y形光纤1C、Y形光纤2A、Y形光纤2C传输,输出端连接光纤准直器d和光电探测器b,光纤准直器d将激光对准光电探测器b,对激光器输出激光强度进行监测;

[0018] 干涉测量:

[0019] 激光经Y形光纤1A、Y形光纤1B传输,输出端连接光纤准直器a,光纤准直器a和光纤准直器b放置于需要测量的流场两侧,激光信号进入流场测试区;在另一侧光纤准直器b收集激光信号后再次耦合进入Y形光纤,经Y形光纤3B、Y形光纤3A传输,构成干涉的测量光路;

[0020] 激光经Y形光纤1A、Y形光纤1C、Y形光纤2A、Y形光纤2B、Y形光纤3C、Y形光纤3A传输,构成干涉的参考光路;

[0021] Y形光纤3A输出端连接光纤准直器c和光电探测器a,测量光与参考光相遇后产生干涉,光纤准直器c将激光对准光电探测器a,对干涉信号进行测量。

[0022] 本发明的有益效果为:

[0023] (1) 测量结果与脉动密度直接相关;

[0024] (2) 非接触测量,不影响流场脉动特性;

[0025] (3) 基于干涉测量,系统灵敏度高,可实现微小脉动密度的测量;

[0026] (4) 利用光纤进行激光的传输,系统抗干扰能力强;

[0027] (5) 利用Y形光纤实现光信号的分光和复合,系统结构紧凑、调节简便,且激光光源利用率高;

[0028] (6) 系统测量脉动频率取决于光电探测器响应频率,目前光电探测器制造水平可以实现上百MHz的带宽,因此本系统可实现上百兆赫兹的响应频率,远高于利用压电传感器测量方法的1MHz响应频率。

## 附图说明

[0029] 图1为本发明中高超声速流场脉动密度测量系统的构成原理框图。

[0030] 图2为本发明中标定装置的结构示意图。

[0031] 图3为本发明中喷嘴射流造成密度脉动的实验结果示意图。

[0032] 其中,1、玻璃压环;2、标定管;3、石英玻璃;4、压力/温度传感器;5、真空泵。

## 具体实施方式

[0033] 下面结合附图进一步说明本发明。

[0034] 实施例1

[0035] 如图1所示,一种高超声速流场脉动密度测量系统,包括激光能量监测系统、干涉测量系统,

[0036] 更为具体的是,包括激光器、光纤耦合器、Y形光纤、光纤连接器、光纤准直器、光电探测器及信号采集器,所述激光器和光纤耦合器连接,

[0037] 所述激光能量监测系统中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1C和光纤连接器a连接,光纤连接器a依次通过Y形光纤2A、Y形光纤2C和激光能量监测组件连接;

[0038] 所述干涉测量系统包括干涉的参考光路和干涉的测量光路,

[0039] 所述干涉的测量光路中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1B和光纤准直器a连接,光纤准直器a和光纤准直器b放置于需要测量流场的两侧,光纤准直器b通过Y形光纤3B、Y形光纤3A和干涉测量组件连接;

[0040] 所述干涉的参考光路中,光纤耦合器通过Y形光纤1A、Y形光纤1C和光纤连接器a连接,光纤连接器a通过Y形光纤2A、Y形光纤2B和光纤连接器b连接,光纤连接器b通过Y形光纤3C、Y形光纤3A和干涉测量组件连接;

[0041] 所述激光能量监测组件为光纤准直器d和光电探测器b组成的结构,所述干涉测量组件为光纤准直器c和光电探测器a组成的结构,光电探测器a和光电探测器b分别和信号采集器连接,通过信号采集器采集信号。

[0042] Y形光纤的一端设置为一根传导光芯,Y形光纤的另一端设置为两根光芯并排放置,通过Y形光纤将光信号进行分路或复合。

[0043] Y形光纤设为3根,分别通过阿拉伯数字1、2、3进行标注,其三个端口分别标注为A、B、C。

[0044] 激光器采用氦氖激光器,在输出端经光纤耦合器将激光束耦合进入Y形光纤中。

[0045] 测量基本原理:

[0046] 本发明的脉动密度测量基于激光干涉的基本原理。流场气体密度与其折射率间关系可以用Gladstone-Dale公式给出:

$$[0047] \quad n = K_{GD\rho} + 1 \quad (1)$$

[0048] 其中,n为折射率, $\rho$ 为流场气体密度, $K_{GD}$ 为Gladstone-Dale系数。

[0049] 根据光的干涉原理,两束光干涉后的强度为:

$$[0050] \quad I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \Delta OPL \right) \quad (2)$$

[0051] 式中 $I_1$ 、 $I_2$ 分别为参与干涉的两束光在未发生干涉时的强度, $\lambda$ 为激光波长, $\Delta OPL$ 为两光束的光程差,定义 $L_1$ 为探测区长度, $L_2$ 为测量光路不包含探测区的长度, $L_3$ 为参考光路长度, $n_2$ 为光纤折射率,则两束光的光程差为:

$$[0052] \quad \Delta OPL = (K_{GD\rho} + 1)L_1 + n_2(L_2 - L_3) \quad (3)$$

[0053] 代入式(2)中则有:

$$[0054] \quad I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} ((K_{GD\rho} + 1)L_1 + n_2(L_2 - L_3)) \right) \quad (4)$$

[0055] 可见探测区气体密度与干涉信号强度直接相关,气体密度变化将引起光强的变化。

[0056] 定义时均相位:

$$[0057] \quad \Phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} ((K_{GD}\bar{\rho} + 1)L_1 + n_2(L_2 - L_3)) \quad (5)$$

[0058] 式中 $\bar{\rho}$ 为测量区气体平均密度。测量系统布局时使 $\Phi_0 = (k + \frac{1}{2})\pi$ ,其中k为整数,以使系统测量脉动密度范围最大,为

$$[0059] \quad \Delta\rho = \frac{\lambda}{2K_{GD}L_1} \quad (6)$$

[0060] 实施例2

[0061] 在实施例1的基础上,不同于实施例1,如图2所示,脉动密度测量范围采用标定装置进行标定,所述标定装置包括玻璃压环、标定管、石英玻璃、压力/温度传感器、真空泵,所述标定管的两端分别设置有玻璃压环和石英玻璃,标定管的中部间隔一定位置处分别设置有压力/温度传感器和真空泵,压力/温度传感器和真空泵均沿着垂直于标定管轴线方向排布设置。

[0062] 标定管两侧加装石英玻璃用于模拟测量区域;压力传感器用于记录标定管内压力;温度传感器用于记录标定管内温度;真空泵用于改变标定管内压力,从而实现对密度的控制。

[0063] 标定装置的标定过程为:

[0064] 1) 将标定装置放置于脉动密度测量系统两光纤准直器之间,即设置在光纤准直器a和光纤准直器b之间;

[0065] 2) 调试设备后,开启真空泵运行,同步记录温度、压力信息和脉动密度输出装置输出信号;

[0066] 3) 待脉动密度装置输出信号呈现完整的余弦三角函数信号后停止真空泵;

[0067] 4) 根据测量结果确定实际的脉动密度测量范围。

[0068] 实施例3

[0069] 在实施例1的基础上,进一步的,所述光纤准直器a和光纤准直器b之间设置标定装置,脉动密度测量范围采用标定装置进行标定,所述标定装置包括玻璃压环、标定管、石英玻璃、压力/温度传感器、真空泵,所述标定管的两端分别设置有玻璃压环和石英玻璃,标定管的中部间隔一定位置处分别设置有压力/温度传感器和真空泵,压力/温度传感器和真空泵均沿着垂直于标定管轴线方向排布设置。

[0070] 一种高超声速流场脉动密度测量方法,采用所述一种高超声速流场脉动密度测量系统,具体包括如下步骤:

[0071] 激光能量监测:激光经Y形光纤1A、Y形光纤1C、Y形光纤2A、Y形光纤2C传输,输出端连接光纤准直器d和光电探测器b,光纤准直器d将激光对准光电探测器b,对激光器输出激光强度进行监测;

[0072] 干涉测量:

[0073] 激光经Y形光纤1A、Y形光纤1B传输,输出端连接光纤准直器a,光纤准直器a和光纤

准直器b放置于需要测量的流场两侧,激光信号进入流场测试区;在另一侧光纤准直器b收集激光信号后再次耦合进入Y形光纤,经Y形光纤3B、Y形光纤3A传输,构成干涉的测量光路;

[0074] 激光经Y形光纤1A、Y形光纤1C、Y形光纤2A、Y形光纤2B、Y形光纤3C、Y形光纤3A传输,构成干涉的参考光路;

[0075] Y形光纤3A输出端连接光纤准直器c和光电探测器a,测量光与参考光相遇后产生干涉,光纤准直器c将激光对准光电探测器a,对干涉信号进行测量。

[0076] 如图3所示,为本发明中实验85-87ms的测量结果,横轴为时间,纵轴为干涉信号测量结果。信号幅值体现密度脉动大小;对干涉信号进行傅里叶变换即可获得脉动信号的频谱特征。

[0077] 以上所述并非是对本发明的限制,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实质范围的前提下,还可以做出若干变化、改型、添加或替换,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

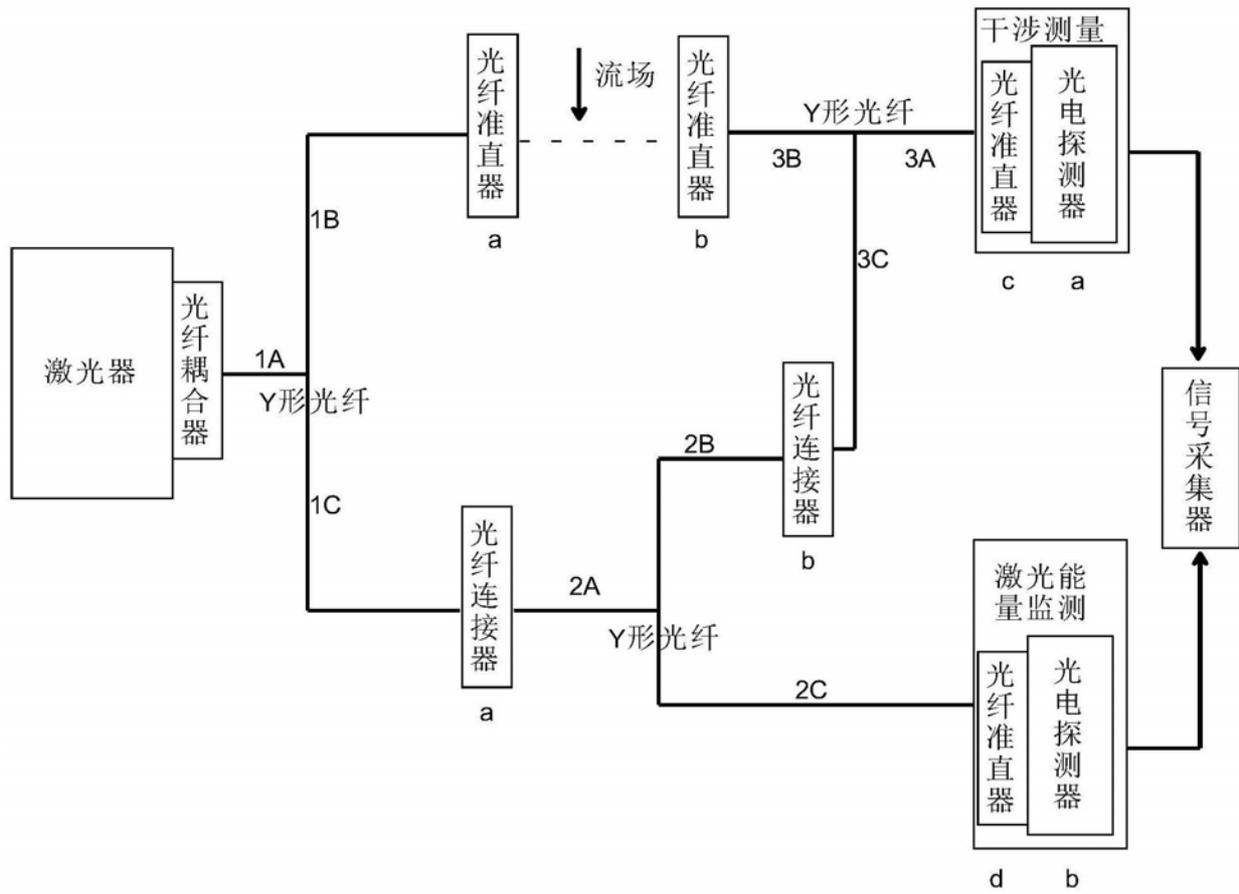


图1

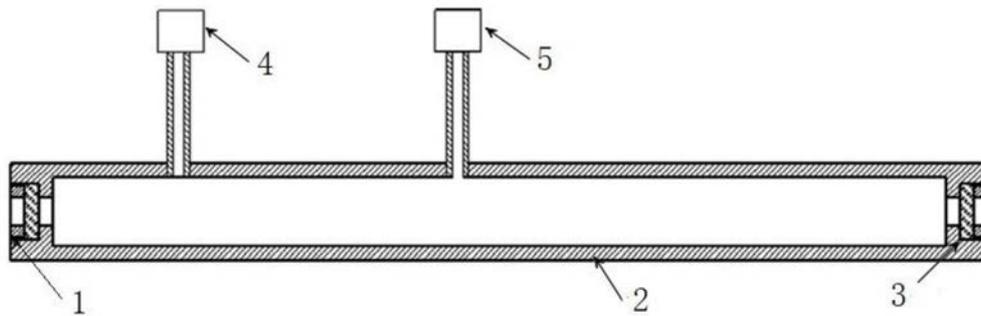


图2

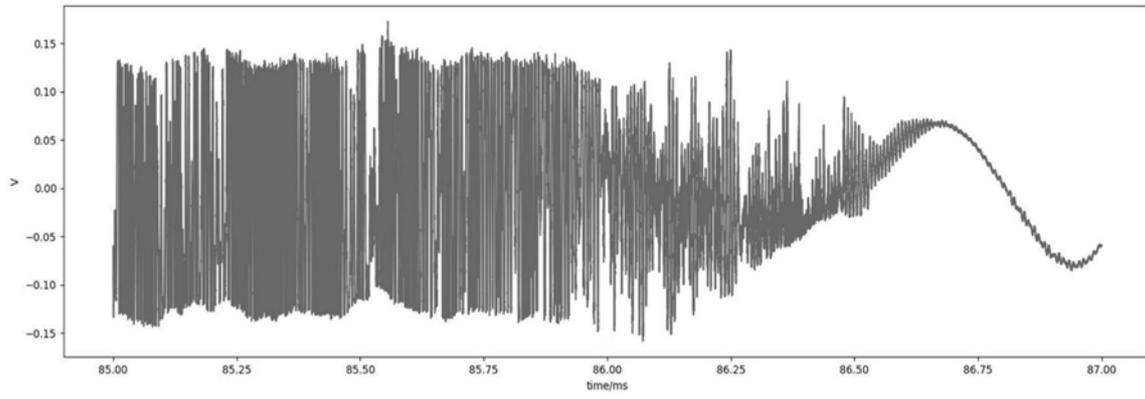


图3