

微小空间碎片撞击发光信号监测及应用研究*

李宏伟† 韩建伟 吴逢时 蔡明辉 张振龙

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

(2013年12月31日收到; 2014年2月10日收到修改稿)

超高速撞击实验中, 通过对撞击发光信号的监测, 利用光谱分析法测量超高速微粒撞击形成等离子体的温度和密度是最有效的方法, 也是深入研究微小空间碎片撞击诱发放电效应的基础. 国内外相关机构已利用该方法对毫米以上微粒撞击等离子体的参数进行了监测, 但是毫米以下微粒撞击发光信号的监测难度更大, 相关研究还未见报道. 本文在等离子体驱动微小碎片加速器上对百微米级微粒超高速撞击的发光信号进行了监测, 对该撞击发光信号以及撞击诱发放电过程中发光的基本特征进行了分析, 并提出了利用撞击发光信号对微粒速度进行测量的方法.

关键词: 微小空间碎片, 撞击发光, 撞击诱发放电

PACS: 96.50.Pw, 94.05.Jq

DOI: 10.7498/aps.63.129601

1 引言

微小空间碎片与航天器发生碰撞的平均速度高达 $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 为超高速碰撞, 碰撞中碰撞颗粒的动能极短时间内转化成碰撞点位置材料的内能, 材料温度急剧升高, 导致材料的气化和高密度的等离子体云的形成^[1-8]. 如果撞击发生在航天器充放电敏感的区域以及航天器太阳电池上, 撞击抛射的等离子体极有可能会触发其“异常”放电, 导致航天器放电阈值降低频次增加, 甚至引起航天器充放电和太阳电池静电放电防护“失效”. 航天器充放电效应是航天器故障的重要原因^[9], 在充放电效应研究中, 研究人员很早就意识到碎片撞击是触发航天器放电的重要机制^[10-16], 但该研究一直处于空白状态. 直到近年来以欧空局 (ESA) 的 Olympus 卫星, 美国 NASA 的 Landsat 5 卫星和 JASON-1 卫星以及日本的 ADEOS 2 卫星和 ALOS 卫星为代表的多颗卫星发生严重故障甚至失效, 被认为极有可能是碎片撞击诱发放电引起的^[15], 使得日美欧等国开始进行相关研究. 日本研究者利用轻气炮开展了毫米级碎片撞击诱发放电的实验, 证实了撞击诱发

放电机理的存在^[17-19]. 国内主要是中国科学院空间科学与应用研究中心和沈阳理工大学分别开展了相关的研究工作^[20-24].

已有的研究结果进一步证实了撞击诱发放电的风险, 同时也使得碎片撞击诱发放电的研究需要对与航天器发生碰撞频率高、存在威胁大的百微米级碎片撞击诱发放电的规律进行深入研究. 为了深入研究撞击诱发放电的规律, 需要对撞击形成的等离子体进行测量. 但是由于撞击等离子体的存在时间短, 传统的方法难以对该类等离子体的参数进行测量. 目前, 国内外相关研究机构利用光谱测量方法成功实现了对毫米级碎片撞击等离子体参数的测量^[3,4,22,23]. 该方法对百微米级碎片撞击等离子体参数的测量有一定的借鉴意义, 但是毫米级碎片撞击实验是在轻气炮上开展的, 微粒的撞击位置和撞击时间可以在实验前进行设定且毫米级微粒撞击发光的信号强度更大, 因此对该撞击发光信号的测量相对有利. 目前百微米级微小空间碎片超高速撞击模拟实验只能在等离子体驱动微小碎片加速器上进行, 该类加速器的工作特点是每次能加速多个微粒, 且微粒的速度和发生撞击的位置有一定的分

* 国家自然科学基金 (批准号: 41174263) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lh718@nssc.ac.cn

布,使得对其发光信号的监测难度大大增加.本文通过选择合适的透镜及光纤对撞击发光信号进行收集,顺利实现了对撞击发光信号的监测,为利用光谱仪实现对百微米级碎片撞击等离子体的测量奠定了基础,并根据撞击发光的特点提出和实现了利用撞击发光对微粒速度测量的新方法.

2 实验设计

实验在中国科学院空间科学与应用研究中心的等离子体驱动微小碎片加速器上进行,实验的布局如图1所示.等离子体驱动微小碎片加速器在工作时处于高真空状态,真空度优于 5×10^{-3} Pa.加速器工作时,在其等离子体枪中通过电容放电形成高速、高温和高密度的等离子体,并在等离子体枪的末端把被加速的百微米尺寸的微粒加速到 $1\text{--}15 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ [25–27].微粒完成加速后从碎片加速器炮室出发,经飞行管道飞行6 m后撞击在加速器靶室中的实验样品上,完成撞击实验.加速器工作过程中形成的等离子体及其发光被加速器飞行管道中直径3 cm的孔栏进行抑制,但是仍然会形成一定的干扰,该干扰固定出现在加速器工作的时刻(图3所示的0–400 μm 时间区间),而微粒撞

击发生在加速器工作后400 μm 以后(如图3所示),因此等离子体加速器工作过程中的等离子体不会影响实验测量.加速器靶室中撞击样品的背部布置有压电传感器,通过压电传感器来获取微粒的到达时间,结合碎片加速器给出的微粒运动的起始时间和飞行距离,利用飞行时间法实现对微粒速度的测量[28].

实验中微粒的速度和撞击位置存在一定的分布,与毫米级微粒撞击相比,其发光信号更弱,使得对该尺寸微粒超高速撞击发光信号的监测难度非常大.为了对微粒撞击的发光信号进行测量,在撞击靶的斜前方布置有带透镜的光纤.通过带透镜的光纤能够增加光纤探头的探测面积,如图2所示;光纤单独收集发光信号时,只能收集到与光纤正对的靶上很小范围内的发光信号,而加上透镜之后使得撞击在靶上所有位置上的发光信号都能被有效收集.此外,透镜能够增加光纤的接收面积,在本实验中,光纤的截面直径为0.6 mm,而透镜的截面为5 mm,因此加上透镜之后光纤对发光信号的有效接收面增加了约2个量级.带透镜的光纤接收的光被光电管(光电管选用的日本滨松光子有限公司的CR110型光电管)转换为电信号,并被示波器记录.

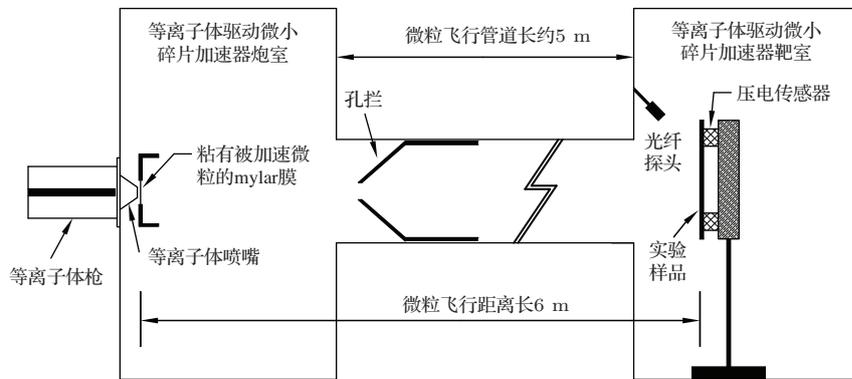


图1 等离子体驱动微小碎片加速器中撞击发光测量实验布局图

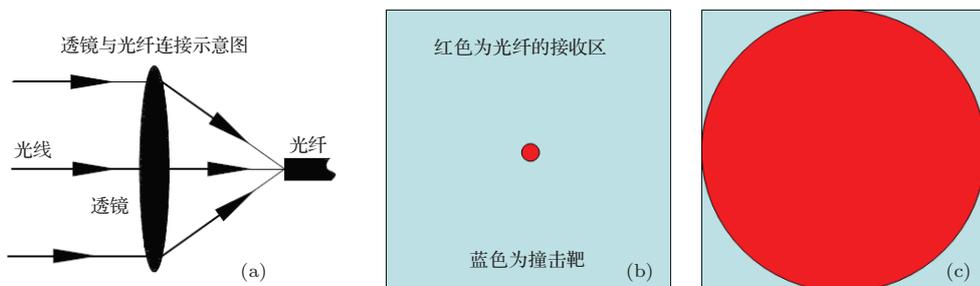


图2 (网刊彩色)带透镜的光纤 (a) 光纤与透镜的布局示意图; (b) 不加透镜时光纤在靶上的接收区域; (c) 带透镜的光纤在靶上的接收区域

3 实验结果分析

3.1 超高速撞击发光信号实验结果

实验在等离子体驱动微小碎片加速器上开展, 加速器的工作条件是4组电容器进行充电, 总电容量是 256 μF , 充电电压为 17.5 kV, 被加速器的微粒是 200 μm 的玻璃珠. 图 3 所示为加速器一次加速过程中超高速微粒撞击在靶上, 捕获到的发光信号和压电传感器采集到的撞击信号, 其中 0 时刻的干扰是加速器工作时形成的发光干扰和电磁干扰对测试设备形成的影响, 该时刻也是微粒超高速运动的起始时刻, 压电传感器采集的震荡信号即为微粒到达撞击靶的时刻, 微粒的飞行距离是 6 m, 利用飞行时间法可以获取微粒的速度. 从微粒撞击到靶上至微粒的发光信号和压电信号被示波器采集的时间都在几微秒以内, 因此压电传感器采集的信号和光电管采集的发光信号在时间上应该对应, 如图 3 所示. 从图 3 中可以清楚地看到, 2000 μs 以前 (微粒速度大于 3 km/s) 微粒撞击形成的发光信号强, 而之后的发光信号急剧减弱, 5000 μs 以后 (微粒速度小于 1.2 km/s) 难以监测到发光信号. 以上实验结果表明, 当微粒速度高于 3 km/s 时, 利用该方法对撞击发光信号进行监测, 收集到的发光脉冲其信号强、信噪比高. 该方法预期能为后续用光谱仪对百微米级微粒撞击形成的等离子体的参数测试奠定基础.

图 4 所示为典型撞击发光信号的细节图, 发光信号为一脉冲信号, 其上升时间约 2 μs , 脉冲宽度约 13 μs . 超高速撞击过程中微粒的动能转化为撞击碎片云的内能, 形成温度为 50000 K 左右的低电离度的等离子体, 等离子体的激发和复合过程是产生发光的原因. 德国 Dominic 对毫米级微粒超高速撞击等离子体演化过程的研究揭示等离子体温度在其形成后的 3 μs 内从 45000 K 急剧降低到 2000 K, 且光谱仪的测试结果显示在前 3 μs 内, 等离子体的发射光谱是连续谱, 之后变为线状谱. 因此, 对于图 4 所示的发光信号, 可以认为前 2 μs 时间内以撞击过程中能量的转换和致密等离子体的激发为主, 之后则以等离子体的扩散和复合为主.

3.2 超高速撞击诱发放电发光信号实验

在撞击实验的基础上把撞击靶换成梳状电极结构的靶, 连接适当的电路 (如图 5 所示) 进行撞击

诱发放电实验, 并对放电发光信号进行监测. 等离子体驱动微小碎片加速器的工作参数、被加速的微粒等参数与上述实验相同.

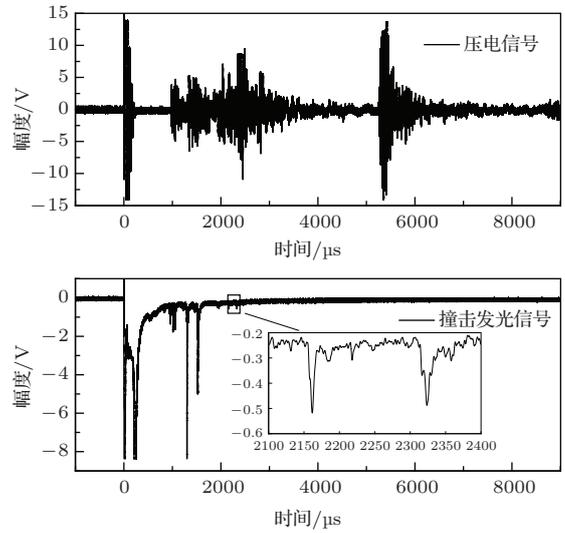


图 3 撞击发光信号实验结果

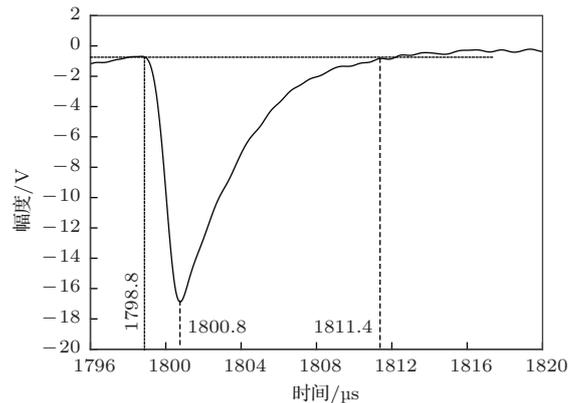


图 4 典型发光信号细节

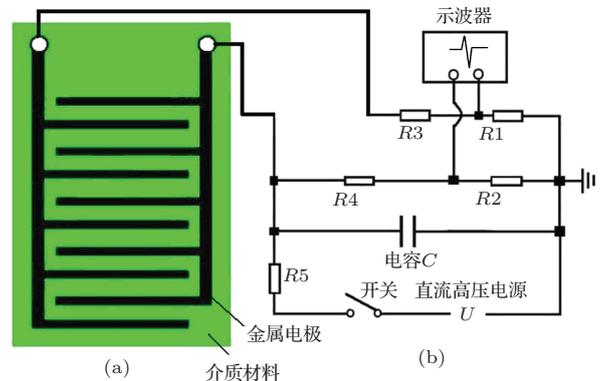


图 5 撞击诱发放电实验原理图 (a) 实验样品图; (b) 实验电路图

实验前通过最高输出电压 3000 V, 最大输出电流 10 mA 的直流稳压电源给图 5 所示试样供电. 由

于撞击诱发放电的电流达到安培量级, 远超直流稳压电源的最大输出电流, 若直接用直流稳压电源给放电回路供电, 放电发生瞬间就会由于电流过载而保护, 使得电极间的电压迅速降低, 因此在放电回路中按图 5 所示串联一个电容储存电荷, 使得放电发生时电极间仍能够保持较高的电压.

由于加速器一次加速过程发射多个微粒, 因此如果满足撞击诱发放电的触发条件就会触发多次放电, 其典型的实验结果见图 6. 图 6 所示为典型的一次实验中对放电电流、撞击发光以及放电过程中电极间偏压的监测结果. 实验中监测到 3 个撞击诱发放电信号, 其中第一次撞击诱发放电发生时电极间的偏压约 600 V, 对应的放电电流和发光信号强; 放电之后电极间的偏压减小到约 80 V, 使得后两个放电的电流和发光强度显著降低. 图 7 所示为上述撞击诱发放电中放电电流和发光信号的细节, 其中第一个放电信号的电流约为 0.6 A, 电流持续时间约 86 μs , 发光持续时间更长约为 100 μs , 且发光信号中存在多个峰值, 这可能与撞击形成的低电离度的等离子体在 600 V 的高电压作用下多次电离激发与复合的过程有关. 第 2 和第 3 个放电中, 由于电极间的偏压降低到 80 V, 放电电流降低一个量级, 放电持续时间分别降低到 1 和 2.4 μs , 发光信号的相对幅度为 14 和 11, 发光信号的持续时间分别为 12.8 和 15.5 μs , 其特征与只有撞击时的相近. 可见, 在偏压较低的情况下, 等离子体没有被激发, 只有少量等离子体被电极收集, 因此撞击发光时间远长于放电持续时间.

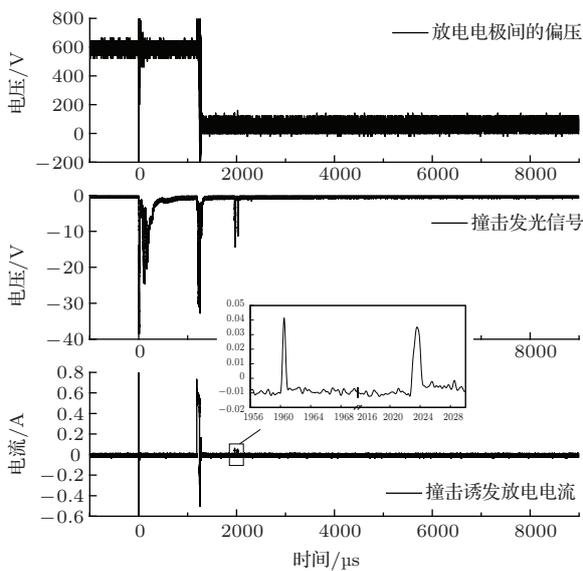


图 6 撞击诱发放电及发光测试结果

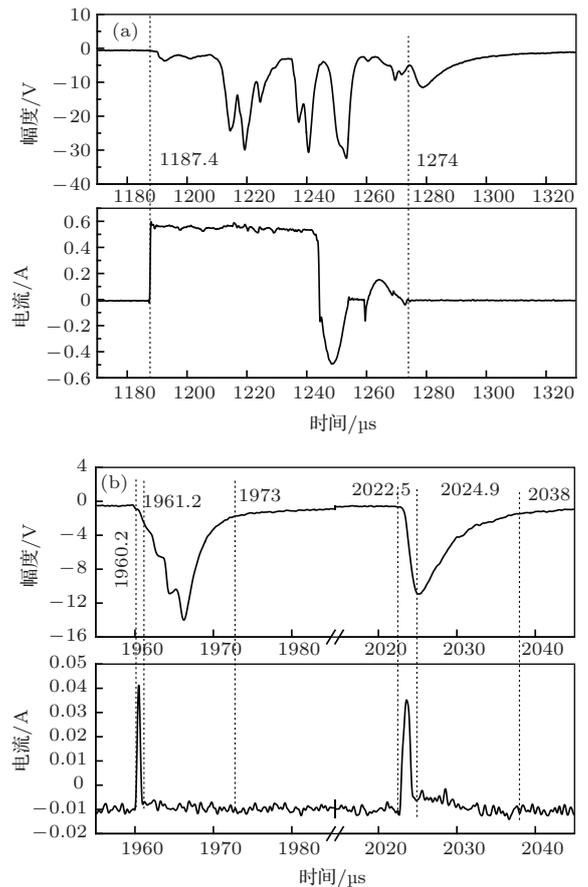


图 7 不同偏压下撞击诱发放电发光信号及放电电流 (a) 高偏压条件; (b) 低偏压条件

4 利用撞击发光进行微粒速度测量

由于微粒超高速撞击时会在撞击瞬间形成发光信号, 且发光信号是一个脉冲宽度仅为 10 μs 左右的单脉冲信号 (如图 3 所示), 与传统的压电传感器获得的震荡衰减信号相比, 其时间分辨率更高. 因此, 完全可以通过测量撞击发光信号来实现对微粒到达时间的测量, 再结合碎片加速器工作过程中提供的微粒运动的起始时间和飞行距离, 利用飞行时间方法就可以计算出微粒的速度.

此外, 根据超高速撞击发光的光强与微粒撞击速度和质量相关, 撞击发光信号的上升时间也由微粒的速度和质量决定; 且当微粒及撞击靶的材料确定后, 撞击发光强度和发光信号的上升时间这两个参量分别是微粒撞击速度与微粒质量的函数, 其具体关系如下 [5]:

$$I = \lambda_1 m \nu^{\beta_1}, \quad (1)$$

$$t = \lambda_2 m \nu^{\beta_2}, \quad (2)$$

其中, I 为发光强度, t 为发光信号上升时间, m 为微粒质量, ν 为微粒速度; $\lambda_1, \lambda_2, \beta_1, \beta_2$ 为与微粒

材料及撞击靶材料相关的系数, 这些系数可以通过实验获得, 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \beta_1$ 为正实数, β_2 为负实数.

对于地面超高速撞击实验中, 可以通过实验获取 $\lambda_1, \lambda_2, \beta_1, \beta_2$. (1) 式中发光强度 I 与上述带透镜的光纤通过光电管和示波器获取的信号幅度相关, 通过实验标定即可获取其关系, 微粒的速度通过前面所述的飞行时间法可以获得, 因此根据 (1) 式可以获取微粒的质量. 所以, 通过测量超高速撞击的发光信号, 可以实现同时对微粒速度和质量的测量.

微粒撞击发光信号的上升时间可以通过上述的带透镜的光纤及光电管组成的系统测量直接获得, 根据 (1) 和 (2) 式可以获得两个方程, 联立求解这两个方程就可以获取微粒的质量和速度. 因此, 仅通过测量超高速撞击的发光信号, 就可以推断出微粒的速度和质量, 实现对微粒速度和质量的同时测量.

5 结 论

通过带透镜的光纤对百微米级高速微粒撞击发光信号进行了监测, 实验结果显示撞击发光信号的持续时间约为 $10 \mu\text{s}$, 其中前 $2 \mu\text{s}$ 以撞击激发电离形成的发光为主, 之后以电离成分的复合发光为主. 对撞击诱发放电过程中发光的监测结果表明, 高电压下的发电中, 撞击形成的低电离度的等离子体中会伴随着中性气体成分的多次击穿电离, 使得放电电流的幅度和持续时间大大加强; 低电压下的放电中, 放电电流的幅度和持续时间减弱, 撞击发光时间远长于放电持续时间, 只有少部分等离子体参与到放电过程. 最后, 提出了两种利用微粒撞击发光信号进行超高速微粒速度的测量方法: 首先根据撞击发光信号能够准确反映微粒超高速撞击的时间特性, 可以利用飞行时间法对微粒的速度进行测量; 其次根据撞击发光信号的强度与微粒撞击速度和质量的经验关系可以对微粒速度进行测量.

参考文献

- [1] Li H W, Han J W, Huang J G, Cai M H, Li X Y, Gao Z X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1385 (in Chinese) [李宏伟, 韩建伟, 黄建国, 蔡明辉, 李小银, 高著秀 2010 物理学报 **59** 1385]
- [2] Steve R B, Frank R 1999 *International J. Impact Engin.* **23** 67
- [3] Dominic H, Martin S, Jens O, Frank S 2013 *Procedia Engineering* **58** 654
- [4] Tsembelis K, Burchell M J, Cole M J, Margaritis N 2008 *International J. Impact Engin.* **35** 1368
- [5] Eichhorn G 1976 *Planet Space Sci.* **24** 771
- [6] Gerhard D 2008 *Advances in Space Research* **41** 1123
- [7] Lee N, Close S, Lauben D, Linscott I, Goel A, Johnson T, Yee J, Fletcher A, Srama R, Bugiel S, Mockler A, Colestock P, Green S 2012 *International J. Impact Engin.* **44** 40
- [8] David A C, Schultz P H 1999 *International J. Impact Engin.* **23** 169
- [9] Cao M, Wang F, Liu J, Zhang H B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127901
- [10] Foschini L 1998 *Europhys. Lett.* **43** 226
- [11] Levy L, Mandeville J C, Siguler J M, Reulet R, Sarraill D, Catani J P, Gerlach L 1997 *IEEE Trans. Nuclear Sci.* **44** 2201
- [12] Carolyn K P, Henry B G, Whittlesey A C, Stevens N J 1984 *NASA Technical Paper* 2361-1984
- [13] European Cooperation for Space Standardization 2008 *ECSS-E-ST-20-06C Spacecraft Charging[S]. Netherlands: ESA Requirements and Standards Division*
- [14] Michael G R 2011 *NASA-Handbook-4002a*
- [15] Henry B G, Sigrid C 2012 *12th Spacecraft Charging Technology Conference* Kitakyushu, Japan, May 14-18, 2012
- [16] Marvin H T, Simon P W, Michael G B, Randall K B 2000 *Earth, Moon and Planets* **82** 27
- [17] Akahoshi Y, Nakamura T, Fukushima S, Furusawa N, Kusunoki S, Machida Y, Koura T, Watanabe K, Hosoda S, Fujita T, Cho M 2008 *International J. Impact Engin.* **35** 1678
- [18] Harano T, Machida Y, Fukushima S, Koura T, Hosoda S, Cho M, Akahoshi Y 2006 *International J. Impact Engin.* **33** 326
- [19] Fukushima S A, Watanabe Y K, Nagasaki T, Sugawara K, Koura T, Cho M 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2434
- [20] Gao Z X, Li H W, Cai M H, Liu D Q, Huang J G, Han J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039601 (in Chinese) [高著秀, 李宏伟, 蔡明辉, 刘丹秋, 黄建国, 韩建伟 2012 物理学报 **61** 039601]
- [21] Li H W, Han J W, Cai M H, Wu F S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 229601 (in Chinese) [李宏伟, 韩建伟, 蔡明辉, 吴逢时 2013 物理学报 **62** 229601]
- [22] Zhang W, Tang E L, Xiang S H, Yang M H, Li L X, Yu H 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 3412 (in Chinese) [张薇, 唐恩凌, 相升海, 杨明海, 李乐新, 于辉 2011 强激光与粒子束 **23** 3412]
- [23] Tang E L, Zhang Q M, Zhang W, Yang M H, Xiang S H, Li L X, He L P 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2454 (in Chinese) [唐恩凌, 张庆明, 张薇, 杨明海, 相升海, 李乐新, 贺丽萍 2012 强激光与粒子束 **24** 2454]
- [24] Cai M H, Wu F S, Li H W, Han J W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 019401 (in Chinese) [蔡明辉, 吴逢时, 李宏伟, 韩建伟 2014 物理学报 **63** 019401]

- [25] Huang J G, Han J W, Li H W, Cai M H, Li X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7950 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟, 李宏伟, 蔡明辉, 李小银 2008 物理学报 **57** 7950]
- [26] Han J W, Zhang Z L, Huang J G, Li X Y, Chen Z F, Quan R H, Li H W 2006 *Spacer. Envir. Eng.* **23** 205 (in Chinese) [韩建伟, 张振龙, 黄建国, 李小银, 陈赵峰, 全荣辉, 李宏伟 2006 航天器环境工程学报 **23** 205]
- [27] Gao Z X, Feng C H, Yang X Z, Huang J G, Han J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 145201 (in Chinese) [高著秀, 冯春华, 杨宣宗, 黄建国, 韩建伟 2012 物理学报 **61** 145201]
- [28] Zhang Z L, Han J W, Quan R H, Li H W, Huang J G, Li X Y, Cai M H 2007 *4th China Space Debris Conference* Nanjing, China, November 5–8, 2007 (in Chinese) [张振龙, 韩建伟, 全荣辉, 李宏伟, 黄建国, 李小银, 蔡明辉 2007 第四届全国空间碎片专题研讨会, 中国南京, 11 月 5–8 日 2007]

Detection of small space debris impact induced flash and its application*

Li Hong-Wei[†] Han Jian-Wei Wu Feng-Shi Cai Ming-Hui Zhang Zhen-Long

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 31 December 2013; revised manuscript received 10 February 2014)

Abstract

In the research of space debris impact induced discharge the measurements of the density and temperature of the impact plasma are very important and difficult. Spectrum analysis is the best method of measuring the density and temperature of hypervelocity impact induced plasma. This method has been successfully used for detecting the density of the plasma produced by hypervelocity particles with diameters larger than 1 mm. In this paper, we present a method of detecting the light flash that is produced by the hypervelocity impact of 200 μm particles which is the foundation for the spectrum analysis method. The characteristics of the light flash of the impact and the impact induced discharge are also discussed.

Keywords: small space debris, impact inducing flash, impact inducing discharge

PACS: 96.50.Pw, 94.05.Jq

DOI: 10.7498/aps.63.129601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41174263).

[†] Corresponding author. E-mail: lhw718@nssc.ac.cn