

激光诱导等离子体模拟微小空间碎片撞击诱发 放电研究*

李宏伟[†] 韩建伟 蔡明辉 吴逢时 张振龙

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

(2014年1月27日收到; 2014年2月17日收到修改稿)

微小空间碎片撞击诱发放电能够触发航天器的在轨工作异常甚至失效, 对航天器的安全运行构成严重威胁. 国内外相关机构已经利用地面模拟装置对撞击诱发放电的机理进行了初步的研究, 但是更深入的研究由于实验条件的限制受到制约, 本文根据激光诱导等离子体与碎片撞击诱发等离子体参数相似的特点, 首次提出了利用脉冲激光诱导等离子体技术模拟微小空间碎片撞击诱发放电的方法, 并从理论上对该方法进行分析, 初步的实验结果证实了该方法的可行性.

关键词: 微小空间碎片, 脉冲激光, 撞击诱发放电

PACS: 96.50.Pw, 94.05.Jq

DOI: 10.7498/aps.63.119601

1 引言

航天器在轨运行期间将不可避免的与微小空间碎片及微流星发生频繁碰撞, 碰撞形成的致密的等离子体^[1-3]一旦覆盖到航天器充放电敏感的区域以及航天器太阳能电池上, 将会形成瞬时导电通道触发其异常放电, 导致航天器放电阈值降低频次增加, 使得航天器充放电和太阳能电池静电放电防护失效, 对航天器的安全运行构成严重的威胁^[4-6]. 因此, 该机理被认为是微小空间碎片及微流星撞击效应中最危险的作用机理^[6,7]且极有可能是近年来以欧空局(ESA)的Olympus卫星, 美国航空局(NASA)的Landsat 5卫星和JASON-1卫星和日本的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的元凶^[6,8,9].

本世纪初, Lai根据充放电的物理过程和撞击形成等离子体的特点, 对微流星撞击诱发放电的机理进行了详细的分析并呼吁加强该效应的研究^[6]. 2006年开始日本研究者利用轻气炮开展

了毫米级碎片撞击诱发太阳能电池放电的模拟实验, 证实了撞击诱发放电机理的存在^[10-12]. Putzar等2008年利用轻气炮加速1.5—4 mm的微粒到约7 km/s的速度, 撞击典型的航天器外壳材料, 并在撞击点附近布置有典型的电缆线(包括信号线、数据线、电源线)和电子元件等, 观测撞击瞬间形成的电磁辐射对正常工作电路的影响, 实验结果发现撞击形成的电磁干扰能够对电缆线和电子元件形成干扰甚至导致其报错^[13]. 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开展了相关的研究工作, 空间中心利用等离子体驱动微小碎片加速器开展了模拟实验, 在国际上首次获得了200 μm微粒超高速撞击诱发放电的实验结果, 表明数量巨大的百微米级的微小空间碎片撞击也能触发放电^[14-18]; 沈阳理工大学利用轻气炮开展实验, 对撞击等离子体的参数进行了测量^[19,20].

目前的研究已经证实了撞击诱发放电的风险, 急需对撞击诱发放电的规律进行深入研究, 特别是百微米级碎片撞击诱发放电, 由于其撞击频率高, 其影响更加严重. 目前百微米级碎片加速装置是等

* 国家自然科学基金(批准号:41174263)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lhw718@nssc.ac.cn

离子体驱动微小碎片加速器,其特点是每次加速多个颗粒且微粒速度和撞击位置难以精确控制,对撞击诱发放电的规律进行深入研究难度大.超高速撞击形成的等离子体是触发微小空间碎片撞击诱发放电的关键因素,而激光诱导等离子体能够通过调节激光参数形成与撞击等离子体特征相似的等离子体^[2,21-23].根据这一特点首次提出利用激光诱导等离子体模拟微小空间碎片撞击诱发放电的方法,该方法充分利用激光诱导等离子体技术相对成熟参数调节精确方便的优势,能够为深入研究微小空间碎片撞击诱发放电奠定基础.

2 理论分析

2.1 微粒超高速撞击过程的理论分析

超高速撞击过程中由于冲击波的产生以及材料的相变甚至等离子体的形成导致其过程非常复杂,并在撞击点附近形成尺寸远大于弹丸尺寸的撞击坑和大量二次碎片云,如图1(a)所示.碰撞形成的冲击波沿材料内部传播过程中伴随着巨大的压力(大于100 GPa)传递和能量传递,导致材料的破坏和局部区域温度迅速升高(超过10000 K)甚至气化以及等离子体的形成.其中撞击速度是影响冲击

波峰值压力和材料最高温度的关键参数,当碰撞速度低于5 km/s时,撞击产物以固体颗粒为主;当碰撞速度超过25 km/s时,撞击产物基本都气化;速度介于5—25 km/s的碰撞是既有固体颗粒又有液体和气体的复杂混合物.空间碎片与航天器发生碰撞的平均速度为10 km/s,其相互碰撞形成的是固体、液体、气体和等离子体的混合物^[7].Dominic等^[2]对撞击等离子体的参数进行了详细测量,撞击形成等离子体的参数中,电子密度 10^{17} — 10^{19} cm^{-3} 电子温度的范围是2000—45000 K,等离子体的形成时间约为1.5 μs .

超高速撞击过程中,微粒动能的传递和转移时间可以通过对弹丸前端的压力的分析获取,模拟实验结果表明当撞击发生时刻弹丸的压力迅速增加,在100 ns时间内立即衰减,因此可以初步认为弹丸动能转移的时间小于100 ns.该时间可以作为激光诱导等离子体模拟碎片撞击等离子体实验中激光脉冲宽度的参考时间.

2.2 激光诱导等离子体的理论分析

在激光诱导等离子体的实验中,一般采用单脉冲能量较高价格便宜的纳秒激光器^[24].激光作用在不透明的固体表面,部分能量被反射,部分能量被吸收,其吸收和反射的比例与波长及材料种类和材料表面形貌密切相关.随着激光作用在固体表面的功率密度的增加固体表面会出现融化、汽化甚至形成等离子体,当激光功率密度超过 10^8 W/cm^2 时,材料表面的吸收系数将显著增加,固体材料由于激光作用过程中将会形成等离子体和强烈的冲击波,且冲击波将成为导致材料机械损伤的主要因素.强激光作用在固体表面形成材料的损伤如图1(b)所示.纳秒激光器诱导等离子体的典型参数是电子密度 10^{16} — 10^{18} cm^{-3} ,电子温度5000—30000 K,形成时间约2 μs ^[21-23].

在激光诱导等离子体与超高速撞击形成等离子体的过程中,虽然其能量加载方式不同,但是都能形成冲击波且冲击波是造成机械损伤和形成等离子体的主要原因,两种方式形成的等离子体特征相似等离子体中电子密度和温度相近.因此,用激光诱导等离子体来替代碎片撞击诱发等离子体研究撞击诱发放电是可行的.

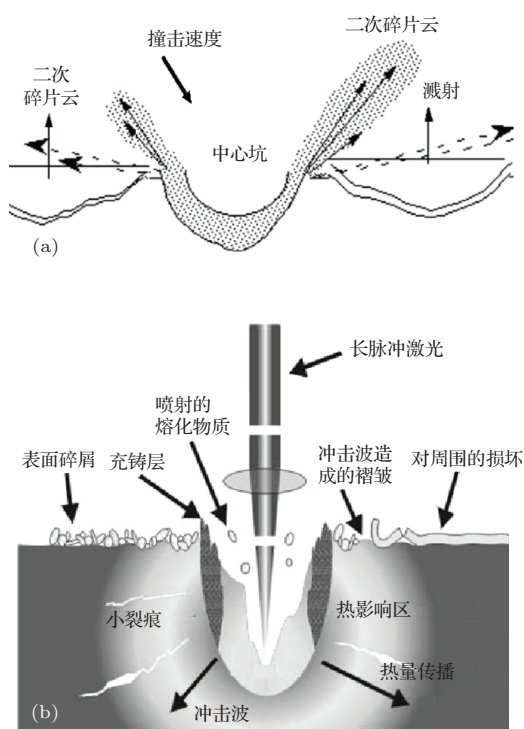


图1 碎片撞击与激光烧蚀成坑示意图

3 激光诱导等离子体与超高速撞击诱导等离子体对比实验

3.1 激光作用与微粒超高速撞击损伤表面形貌对比研究

为了对激光诱导等离子体模拟放电的可行性进行进一步分析, 首先对激光与固体作用形成的烧蚀坑与碎片撞击形成的撞击坑形貌进行对比. 实验选取玻璃和金属铝作为靶材, 其中玻璃作为脆性材料的代表用来反映冲击波的机械损伤特点, 金属铝作为典型的韧性材料的代表. 超高速实验在等离子体驱动微小碎片加速器上进行, 激光实验利用脉

冲宽度为 10 ns, 波长为 1064 nm, 单脉冲能量最高可达 1 J 的 YAG 激光器进行. 脉冲激光器发出的激光经过石英玻璃窗口加入真空度高达 10^{-4} Pa 的真空室, 经透镜聚焦后作用于固体表面.

实验中激光能量为 30 mJ, 激光经过透镜聚焦之后的束斑直径约为 200 μm . 图 2 和图 3 所示为激光作用在铝上和玻璃上形成的典型烧蚀坑和超高速撞击形成的典型撞击坑的对比图. 图 2 中, 金属铝上的烧蚀坑与撞击坑十分类似既包含有明显的中心坑也有边沿翻唇区; 图 3 中玻璃上的烧蚀坑与撞击坑的结构也十分相似都具有明显的中心损伤区和贝壳状损伤区.

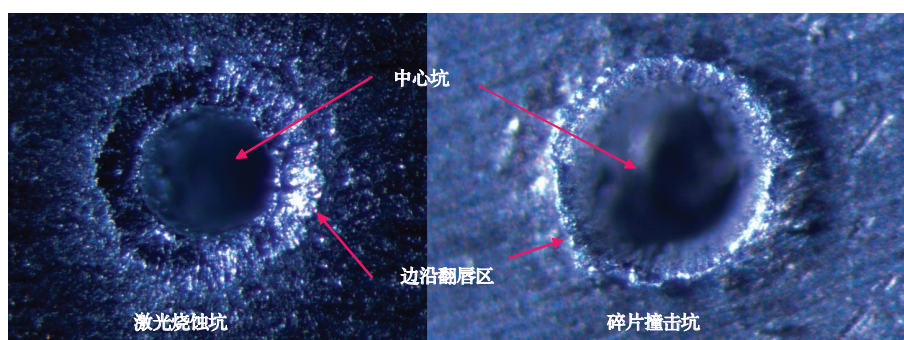


图 2 金属铝上的激光烧蚀坑和撞击坑

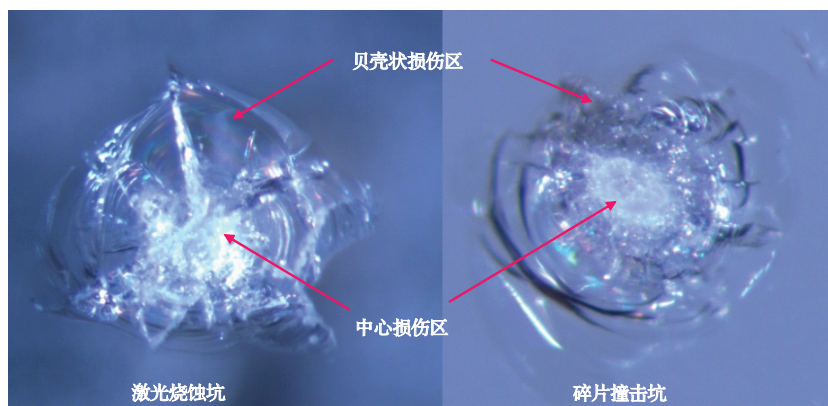


图 3 玻璃上的激光烧蚀坑和撞击坑

3.2 激光作用与微粒超高速撞击发光特征对比研究

利用等离子体驱动微小碎片加速器对超高速撞击发光信号进行了监测, 实验的布局如图 4 所示. 实验中所采用的被加速的微粒是 200 μm 的玻璃珠, 微粒被加速后撞击在加速器靶室中的靶上, 在斜对靶的方位布置有带透镜的光纤对撞击发光信号进

行收集, 收集到的发光信号被光电管转换成电信号之后被示波器记录. 激光诱导等离子体的发光信号监测与撞击发光信号监测实验设置基本一样, 只是与靶发生作用的是经过聚焦的强激光. 此外, 为了保持实验条件一致, 由于等离子体驱动微小碎片加速器工作在 10^{-4} Pa 的高真空状态, 因此激光诱导等离子体实验仍然保持在 10^{-4} Pa 的高真空状态下.

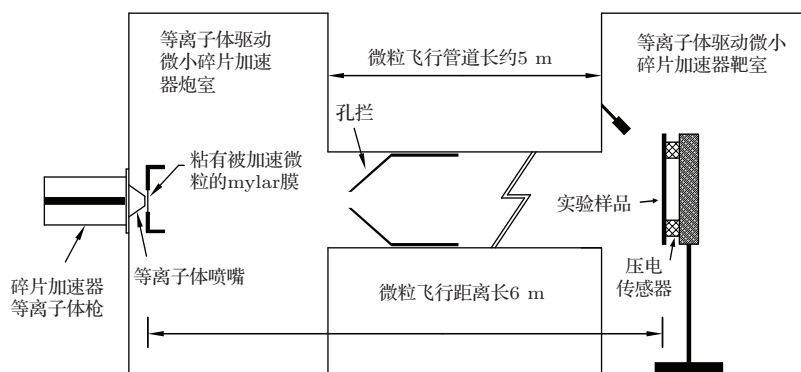


图4 微粒超高速撞击发光监测实验布局图

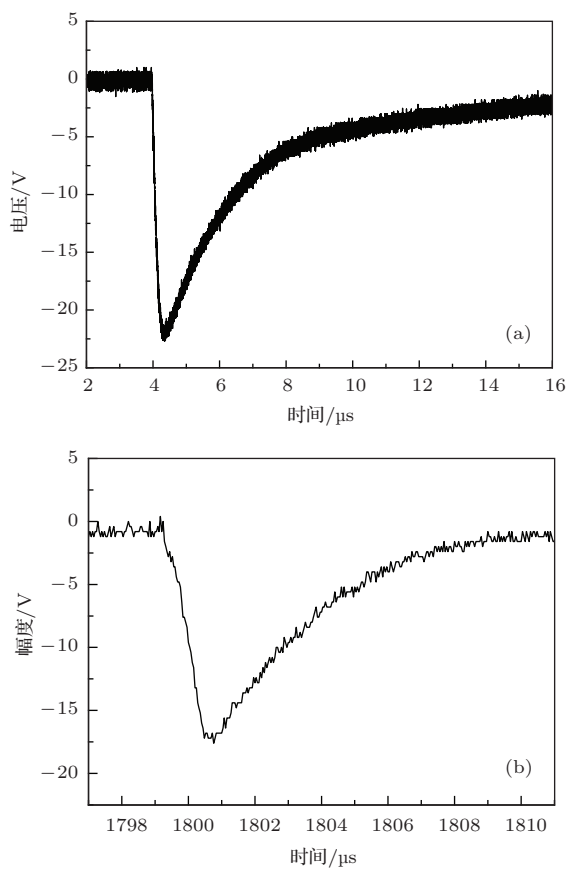


图5 激光诱导等离子体发光与撞击发光对比 (a) 激光诱导等离子体发光信号; (b) 微粒超高速撞击发光信号

由于激光诱导等离子体和碎片撞击诱导等离子体都是高密度的瞬间等离子体, 光谱诊断手段是测量这类等离子体的密度和温度的最佳手段, 但是需要配备价格昂贵的ICCD光栅光谱仪. 在本论文中, 根据现有的实验条件利用光电管对撞击发光信号和激光诱导等离子体的发光信号进行了测量, 通过对发光信号的幅度和持续时间的测量可以粗略反映等离子体的存在时间和密度和演化特征. 测试结果如图5所示, 可以发现撞击发光与激光诱导发

光幅度、持续时间、脉冲形状十分相似.

4 激光诱导等离子体触发放电初步实验

利用激光诱导等离子体方法开展了激光模拟碎片撞击诱发放电的初步实验. 诱发放电的电路及实验样品真空度等实验设置和参数与利用等离子体加速器模拟开展的微小碎片撞击诱发放电相同 [15] 如图6所示. 实验过程中, 通过高压直流电源及电容给梳妆结构的试样加上适当的电压, 模拟航天器太阳电池间的差异带电情况; 脉冲激光通过透镜聚焦后作用在试样上诱发形成等离子体, 等离子体覆盖在梳妆电极间形成放电通道, 诱发放电.

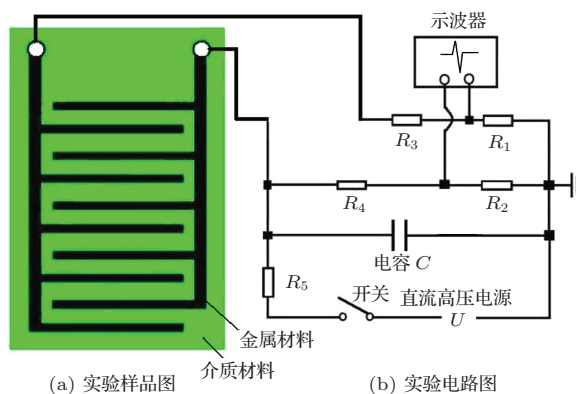


图6 试样及诱发放电电路图

激光诱发放电的实验布局如图7所示, 激光器发出的激光经过分束镜后激光能量按比例分为两束, 其中垂直入射方向的一束被激光能量计接收, 用于激光能量的测量, 另一束沿入射方向继续传播, 经过真空光学窗后被聚焦透镜聚焦作用在试样上, 形成等离子体并诱发放电. 其中试样固定在

可移动样品架上, 样品架可以在平行激光入射方向和垂直激光入射方向上精确移动, 实验前通过移动样品架使得激光聚焦后的焦点处于试样表面.

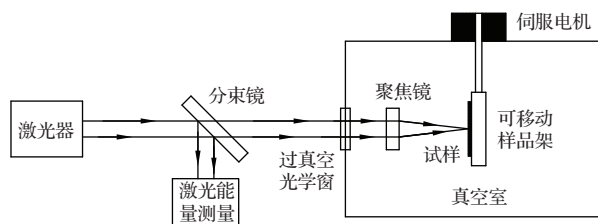


图7 激光诱发放电实验布局图

图8所示为激光诱发放电的实验结果与典型微小空间碎片撞击诱发放电的实验结果对比. 其中, 激光能量为50 mJ, 聚焦后的束斑大小约200 μm , 激光脉冲宽度为10 ns. 激光诱发放电的电流大小约为0.5 A, 持续时间为33 μs , 其特征与微小空间碎片撞击诱发放电的特征十分相似.

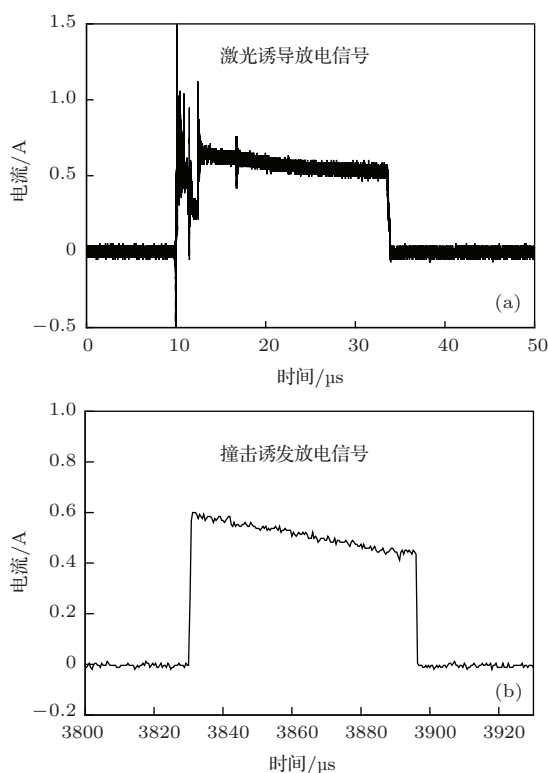


图8 诱发放电电流对比图

5 结 论

微小空间碎片撞击诱发放电对航天器的安全运行构成巨大的威胁, 并得到了国内外相关研究机构的高度重视, 但是现有的实验条件难以深入研究

其诱发放电的机理、阈值条件及影响规律. 由于撞击诱发放电效应中触发的关键是微小碎片超高速撞击形成的等离子体, 只要能够制造出与微小空间碎片撞击形成的等离子体特征相似的等离子体就能把握撞击诱发放电的基本规律. 激光诱导等离子体技术相对成熟, 其形成的等离子体特征与超高速撞击形成的等离子体特征十分相似, 且其参数控制更为便捷, 利用该技术能够极大的促进微小碎片撞击诱发放电的深入研究.

本文据此创造性的提出了激光模拟碎片撞击诱发放电的方法, 并通过对激光诱导等离子体与碎片超高速撞击诱发电离体的过程进行对比分析, 对两种作用过程中对样品表面的形貌损伤开展对比实验, 对两种方式形成等离子体的发光信号进行监测进一步深化了用激光模拟来进行诱发放电研究的基础. 最终, 通过对比实验初步证实了利用激光来模拟碎片撞击诱发放电, 能够得到与碎片撞击诱发放电类似的放电信号, 基本证实了该方法的可行性.

碎片撞击形成的等离子体参数随着碎片动能变化, 激光诱导等离子体的参数由激光能量和束斑尺寸确定, 因此在利用激光模拟碎片撞击诱发放电实验时应根据所模拟的碎片的参数调整激光的参数. 激光参数的调整根据所模拟的碎片的尺寸和碎片撞击形成的等离子体的参数来确定.

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] Dominic Heunoske, Martin Schimmerohn, Jens Osterholz, Frank Schafer 2013 *Procedia Engineering* **58** 654
- [3] Eichhorn G 1976 *Planet Space Sci.* **24** 771
- [4] Purvis C K, Garrett H B, Whittlesey A C, Stevens N J 1984 *NASA Technical Paper* 2361
- [5] Ryschkewitsch M G 2011 *NASA-Handbook-4002a*
- [6] Lai S T, Edmond Murad 2002 *J Spacecraft. Rocket* **39** 106
- [7] Gerhard Drolshagen 2008 *Adv Space Res* **41** 1123
- [8] Garrett H B, Close S 2012 *12th Spacecraft Charging Technology Conference*
- [9] Douglass Caswell R, Neil McBride, Andrew Taylor 1995 *Int. J. Impact Eng.* **17** 139
- [10] Akahoshi Y, Nakamura T, Fukushige S, Furusawa N, Kusunoki S, Machida Y, Koura T, Watanabe K, Hosoda S, Fujita T, Cho M 2008 *Int. J. Impact Eng.* **35** 1678

- [11] Harano T, Machida Y, Fukushige S, Koura T, Hosoda S, Cho M, Akahoshi Y 2006 *Int. J. Impact. Eng.* **33** 326
- [12] Fukushige S, Akahoshi Y, Watanabe K, Nagasaki T, Sugawara K, Koura T, Cho M 2008 *IEEE T. Plasma Sci.* **36** 2434
- [13] Putzar P, Schaefer F, Lambert M 2008 *Int. J. Impact Eng.* **35** 1728
- [14] Li H W 2010 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Graduated University of Chinese Academy of Science) (in Chinese) [李宏伟 2010 博士学位论文 (北京: 中国科学院研究生院)]
- [15] 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]
- [16] Li H W, Han J W, Huang J G, Cai M H, Gao Z X 2013 *IEEE T. Plasma Sci.* **99**
- [17] 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]
- [18] Cai M H, Wu F S, Li H W, Zhang Z L, Han J W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 019401 (in Chinese) [蔡明辉, 吴逢时, 李宏伟, 张振龙, 韩建伟 2014 物理学报 **63** 019401]
- [19] Tang E L, Tang W F, Xiang S H, Li L X, Zhang W, Yu H, Zhao X Y 2011 *High power laser and particle beams* **23** 229 (in Chinese) [唐恩凌, 唐伟富, 相升海, 李乐新, 张薇, 于辉, 赵新颖 2011 强激光与粒子束 **23** 229]
- [20] Tang E L, Zhang Q M, Zhang J 2008 *Journal of Projectiles, Rockets missiles and Guidance* **28** 110 (in Chinese) [唐恩凌, 张庆明, 张健 2008 弹箭与制导学报 **28** 110]
- [21] Zhu D H 2012 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science & Technology) (in Chinese) [朱德华 2012 博士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [22] Li X F, Zhou We D, Qian H G, Li K X, 2011 *Acta optica sinica* **31** 1130001 (in Chinese) [李霞芬, 周卫东, 钱惠国, 李科学 2011 光学学报 **31** 113001]
- [23] Liu N N 2012 *M.S. Thesis* (Changchun: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [刘楠楠 2012 硕士学位论文 (长春: 长春理工大学)]
- [24] Liu J, Tao H Y, Gao X, Hao Z Q, Lin J Q 2012 *Chin. Phys. B* **22** 044206

Simulation of small space debris impact inducing discharge using laser-induced plasma method*

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

(Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100190, China)

(Received 27 January 2014; revised manuscript received 17 February 2014)

Abstract

Small space debris impact that induces discharge can trigger disturbance of a spacecraft, which is a big threat to the safety of it. Research on this effect has already been carried out, but due to the limit of the facilities the research is also restricted. Since the primary cause of small space debris impact that induces discharge is to induce the plasma, similar to the laser inducing the plasma, this paper tries to simulate the space debris impact inducing discharge using a laser-induced discharge method. The analysis and experimental results are given, and they prove that this method is reliable.

Keywords: small space debris, pulse laser, impact inducing discharge

PACS: 96.50.Pw, 94.05.Jq

DOI: 10.7498/aps.63.119601

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

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