

表面微结构对碳化硅晶须掺杂石墨阴极爆炸电子发射性能的影响

华叶 万红 陈兴宇 吴平 白书欣

Influence of surface microstructure on explosive electron emission properties of graphite cathode doped by silicon carbide whiskers

Hua Ye Wan Hong Chen Xing-Yu Wu Ping Bai Shu-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 168102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.168102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Gd 掺杂 ZnO 纳米线磁耦合性质的第一性原理研究

Magnetic coupling properties of Gd-doped ZnO nanowires studied by first-principles calculations

物理学报.2015, 64(17): 178103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178103>

Eu 掺杂 Si 纳米线的光致发光特性

Photoluminescence properties of Eu doped Si nanowires

物理学报.2015, 64(14): 148103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148103>

弯曲 Cu 纳米线相干 X 射线衍射图的计算

Calculation of coherent X-ray diffraction from bent Cu nanowires

物理学报.2015, 64(13): 138102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.138102>

AuPd 纳米粒子作为催化剂制备硼纳米线及其场发射性质

Preparation of boron nanowires using AuPd nanoparticles as catalyst and their field emission behaviors

物理学报.2014, 63(4): 048102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.048102>

ZnO 纳米线薄膜的合成参数、表面形貌和接触角关系研究

Relationships between synthesizing parameters, morphology, and contact angles of ZnO nanowire films

物理学报.2013, 62(21): 218102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.218102>

表面微结构对碳化硅晶须掺杂石墨阴极爆炸电子发射性能的影响

华叶¹⁾ 万红^{1)†} 陈兴宇¹⁾ 吴平²⁾ 白书欣¹⁾

1) (国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙 410073)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2016年1月14日收到; 2016年4月9日收到修改稿)

爆炸发射阴极已广泛应用于高功率微波源, 但常规场致爆炸发射阴极存在使用寿命短或电子发射不均匀的问题, 改善阴极材料是解决这一问题的有效途径. 本文将碳化硅晶须掺杂到石墨中制备得到阴极, 从二极管电流波形上升沿和输出微波脉宽产生的变化着手, 分析了碳化硅晶须掺杂石墨阴极表面材料成分和微观形貌对其电子发射性能的影响机理. 研究发现, 碳化硅晶须的存在, 不仅有利于阴极场发射的快速启动、发射微点数目增多, 还有利于降低等离子体膨胀速度、抑制脉冲缩短现象, 使得输出微波脉宽增大. 随着脉冲发射数量增多, 碳化硅晶须掺杂石墨阴极表面被等离子体不断“抛光”, 微凸起形状因子减小、均匀性提高, 场发射启动速度减慢, 但输出微波脉宽增大.

关键词: 表面微结构, 碳化硅晶须, 电子发射性能, 微波脉宽

PACS: 81.05.Uf, 81.07.Gf, 52.80.Qj

DOI: 10.7498/aps.65.168102

1 引言

爆炸发射阴极已广泛应用于许多高电压 (> 300 kV)、强电流密度 (> 1 kA/cm²) 电子束驱动源系统中, 尤其是高功率微波源 (high power microwave source, HPMS) [1,2]. 阴极是 HPMS 中最重要的部件之一, 最终 HPMS 的特性很大程度上取决于阴极产生电子束的品质. 常规场致爆炸发射阴极存在使用寿命短或电子发射不均匀的问题, 阴极表面微结构, 包括阴极材料成分和阴极表面微观形貌, 是影响和制约阴极寿命和发射均匀性的重要因素, 介质掺杂 (或复合) 是提高爆炸发射阴极性能的重要途径. 孙钧 [2] 制备并研究了浸油石墨阴极和氧化铝粉末掺杂铜基复合材料阴极, 结果表明, 介质的掺入有效提高了爆炸发射阴极的寿命. 张永辉等 [3] 研究了金属-介质复合阴极和石墨-碳纤维复合阴极的电子发射特性, 结果表明, 这两种复合

阴极的工作寿命均有所提高, 介质粉末和碳纤维的加入有利于爆炸发射的产生. 靳振兴等 [4] 对比分析了纯石墨阴极和掺杂铜石墨阴极的微观结构和发射性能, 结果表明, 掺铜石墨阴极在发射性能、微波脉冲宽度和微波脉冲后沿离散性等方面稍优于普通石墨阴极. Krasik 等 [5] 研究了 TiO₂ 粉末掺杂的不锈钢阴极, 结果表明, 由于三相点增强效应, 等离子体在相对较低的加速电场下就已经很快形成, 此阴极可为高电流、高重频的二极管提供稳定的电子源. Bykov 等 [6] 和 Gunin 等 [7] 通过实验证明, 在电压约 500 kV、电流约 5 kA、脉冲宽度约 20 ns 的条件下金属-介质阴极的寿命可以超过 10⁸ 次.

石墨是爆炸电子发射阴极的常用材料, 具有高电压重复频率下运行稳定和超过 10⁶ 次长寿命的优点 [7,8], 但其电子发射的均匀性相对较差 [9-11]. 考虑到碳化硅的功函数 (约 3.5 eV [12]) 低于石墨 (约 4.6 eV [13]), 可形成三相点增强, 有利于场发射的快速启动 [14]; 并且晶须状具有很大的长径比, 其较大

† 通信作者. E-mail: wanhong@nudt.edu.cn

的场增强因子也有利于场发射的快速启动. 因此, 本文选择将碳化硅晶须掺杂到石墨中制备成掺杂石墨阴极, 以期提高石墨阴极的场发射启动速度和电子发射的均匀性. 实验研究发现, 碳化硅晶须掺杂确实是一种提高阴极电子发射性能的有效途径.

2 实验与方法

2.1 阴极制备

掺杂阴极的制备采用固相粉体掺杂法, 主要工艺过程为: 通过表面活性剂的作用, 将碳化硅晶须均匀分散于异丙醇溶剂中, 再加入一定比例的石墨粉和沥青粉, 球磨 5 h 后将得到的浆料油浴蒸干, 然后在鼓风干燥箱内于 80 °C 下干燥 1 h, 研磨、过筛.



图1 环形阴极的外观照片

Fig. 1. Photograph of an annular cathode.

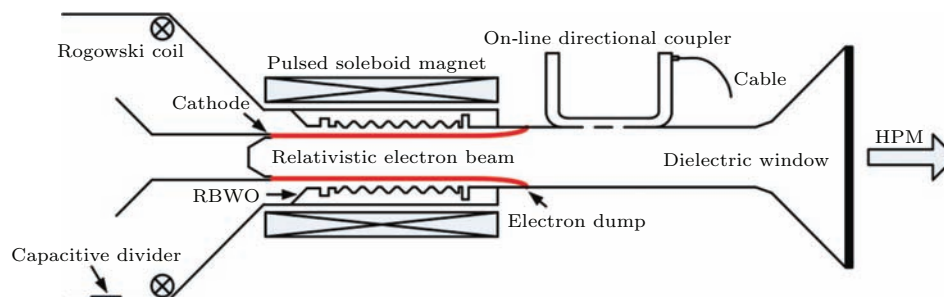


图2 阴极发射及微波产生的实验装置示意图^[15]

Fig. 2. Experimental configuration of cathode emission and microwave generation^[15].

2.3 数据分析方法

二极管电流曲线反映了阴极发射电子束的能力, 包括束流大小和场发射启动速度. 由于实验测得的电流是电子发射束流和电场变化所致的位移电流的叠加^[15–18], 对于场发射启动速度不同的阴极, 其电子束流的产生有快有慢, 因此, 实验测得的

之后, 按照混捏、破碎、再过筛、模压成型、等静压、焙烧、浸渍增密、再焙烧的流程, 制备得到碳化硅晶须掺杂石墨块体, 最后机械加工成环形阴极, 尺寸为 $\Phi 39 \text{ mm} \times 24.2 \text{ mm}$, 环形刀口厚度为 0.5 mm, 如图 1 所示. 对比使用的石墨阴极是以石墨粉和沥青粉为原料采用此方法制备得到.

2.2 实验过程

将制备并加工好的环形阴极在丙酮溶液中超声清洗干净, 再于真空中 500 °C 焙烧去除表面残余油污, 之后安装在 TPG1000 平台进行电子发射实验, 实验装置结构如图 2 所示^[15]. 其脉冲加速器可提供约 970 kV, 9.2 kA 和 50 ns 的电压、电流以及脉宽, 系统压力为 $5.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$. 二极管电压和束流分别由电阻式分压器和 Rogowski 线圈测量, 其测试灵敏度分别为 15.6 kV/V 和 16.6 A/V. 波形数据由数字示波器记录, 时间分辨率设置为 0.2 ns. 实验过程中, 为便于测量和比较微波脉宽, 示波器采集微波波形数据时以微波测点为触发点, 这样得到的微波波形前沿将完全重合. 电子发射以多脉冲连续发射为主, 脉冲重复频率为 10 Hz, 每次连续发射 100 个脉冲, 每隔 1000 个脉冲记录 5—10 组单次发射的实验数据, 将这些数据的平均值用作后续的分析对比.

二极管电流曲线上升沿会有所不同. 若阴极场发射启动较慢, 则电子束流产生较晚, 二极管电流的上升沿会出现位移电流的尖峰; 而对于场发射启动较快的阴极, 其电子束流产生较早, 位移电流峰容易被增长速率更快的电子束流掩盖掉, 因此电流曲线上沿不会出现明显的尖峰^[17]. McBride 等^[19]认为, 位移电流的存在会影响系统实测电流, 负载束

流与实测电流之间的差异也并不能仅仅归因于测量误差和电流损耗的组合.

若将二极管看作电容为 C 的电容器, 则位移电流 I_d 与二极管电压上升沿增长率 dU/dt 的关系如 (1) 式所示, 对于固定的二极管结构, 位移电流与电压增长率成正比. 通过位移电流、电压变化率, 可以计算出二极管电容; 反之, 也可以根据已知的二极管电容及电压变化率曲线, 计算得到位移电流曲线. Wu 等^[17] 研究表明, TPG1000 平台二极管有效电容约 38—46 pF, 本文取 $C \approx 45$ pF, 根据实验测得的电压曲线算出 dU/dt , 再由 (1) 式计算可得位移电流 I_d :

$$C = \frac{I_d}{dU/dt}. \quad (1)$$

输出微波脉宽是 HPMS 的主要参数之一, 它决定了微波转换的能量效率, 如 (2) 式所示^[1]:

$$\frac{\eta_E}{\eta} = \frac{\tau}{\tau_{PP}}, \quad (2)$$

式中, η_E 和 η 分别表示微波的能量效率和微波的功率效率, τ 和 τ_{PP} 分别表示微波和脉冲功率的脉冲宽度. 对于设计好的高功率微波器件, 其功率效率和脉冲功率的脉冲宽度一定, 则能量效率与输出微波的脉冲宽度成正比. 输出微波脉宽增大, 有利于微波能量转换效率的提高.

通常, 输出微波脉冲的时间宽度小于输入脉冲功率 (电压和电流) 的脉冲宽度^[1]. 这一方面与器件结构设计有关, 另一方面与束波耦合过程中的脉冲缩短有关, 脉冲缩短宏观上主要体现在微波下降沿的提前. 脉冲缩短是高功率微波领域的重要问题之一, 也是高功率微波器件的一个普遍现象^[20]. Benford 和 Benford^[21] 认为, 脉冲缩短的发生有四个方面原因: 等离子体的产生、二次电子流、高电场击穿和束流截断. 其中与阴极性能最相关的是阴极等离子体的产生, 等离子体的轴向膨胀会导致二极管阻抗发生变化, 减少了慢波结构中的束波耦合; 其径向膨胀又会导致电子束展宽、半径增大, 电子束与慢波结构内壁的距离缩短, 从而改变耦合关系^[1]. 此外, 在慢波结构和电子收集极处, 电子束对去吸附气体的电离也会产生等离子体, 影响束波耦合过程和微波的产生. 因此, 如果脉冲缩短现象能得到很好的抑制, 则输出微波的脉冲宽度增大. 除了微波下降沿滞后之外, 输出微波脉宽的增大,

还可能归因于起振点的提前. Sun 等^[15] 研究表明, 输出微波起振越快, 阴极发射电子束的均匀性越好. 因此, 如果阴极电子发射的均匀性提高, 也有利于输出微波的脉冲宽度增大.

3 结果与讨论

3.1 碳化硅晶须的作用机理

图 3 对比了碳化硅晶须掺杂石墨阴极和纯石墨阴极 1000 个脉冲发射后实验测得的二极管电流曲线, 为验证实验结果的可靠性, 实验中分别测试了三个碳化硅晶须掺杂石墨阴极和三个纯石墨阴极. 对比发现, 纯石墨阴极的电流曲线上升沿出现了尖峰, 如图 3 (b) 所示; 而碳化硅晶须掺杂石墨阴

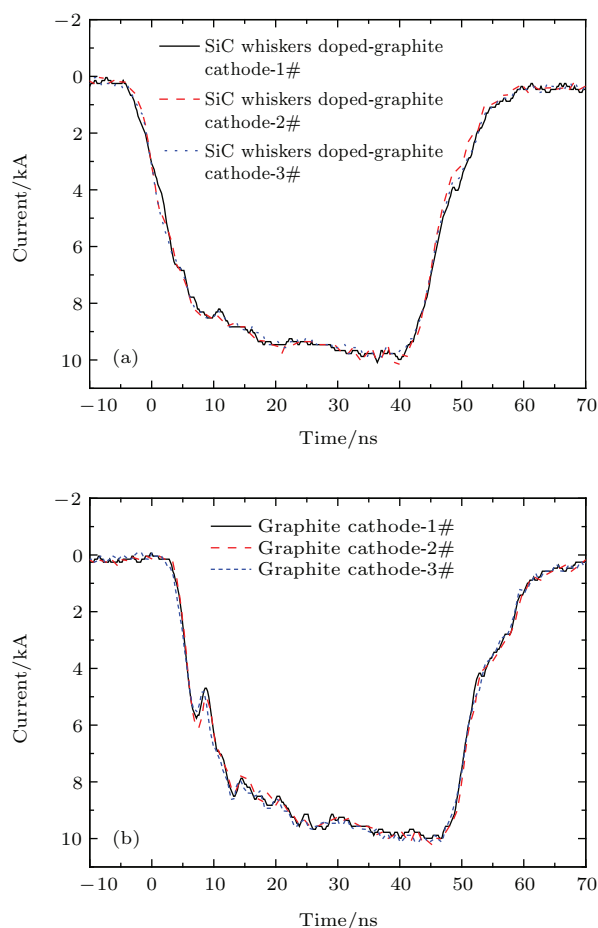


图 3 碳化硅晶须掺杂石墨阴极 (a) 和纯石墨阴极 (b) 1000 个脉冲发射后实验测得的二极管电流曲线 (1#, 2#, 3# 分别对应三个阴极的测试结果)

Fig. 3. The comparison between experimental measured current after 1000 pulses treatment for SiC whiskers doped-graphite cathode (a) and graphite cathode (b) (1#, 2#, and 3# represent the experimental results of three cathodes, respectively).

极的电流曲线上升沿并未出现尖峰,如图3(a)所示. 为了说明尖峰出现的原因,图4对比了碳化硅晶须掺杂石墨阴极和纯石墨阴极1000个脉冲发射后实验测得的二极管电流 I_m 与由(1)式计算得到的位移电流 I_d . 可以看到,对于纯石墨阴极,计算得到的位移电流峰与实验测得电流曲线发生变化的拐点符合,即电流曲线上上升沿出现位移电流峰;而碳化硅晶须掺杂石墨阴极并未出现位移电流峰,这表明碳化硅晶须掺杂石墨阴极具有比纯石墨阴极更快的场发射启动速度. 碳化硅晶须兼具低功函数和大形状因子,为了说明其对场发射启动速度的影响是源于阴极材料的变化还是阴极表面微结构的变化,实验还对比了纯石墨阴极、碳纤维掺杂石墨阴极和SiC颗粒掺杂石墨阴极1000个脉冲发射后实验测得的二极管电流曲线上上升沿,如图5所示. 碳纤维与石墨功函数相当而形状因子大, SiC颗粒与石墨形状因子相当而功函数低. 对比发现,对石墨阴极分别进行碳纤维掺杂和SiC颗粒掺杂后,二极管电流曲线上上升沿的位移电流峰都消失. 这说明,低功函数的材料和大形状因子的表面微结构均有利于加快阴极场发射启动速度,因此,碳化硅晶须对阴极场发射启动速度的加快机理应该是二者兼有.

对比碳化硅晶须掺杂前后,阴极1000个脉冲发射后产生的微波波形如图6所示. 石墨阴极产生的微波脉宽(半高宽)约 (23.3 ± 0.7) ns,而碳化

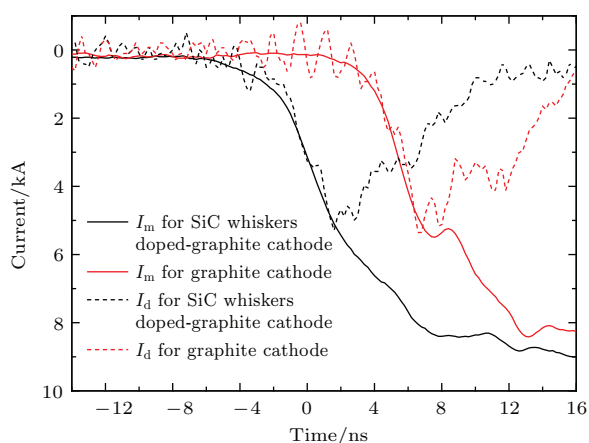


图4 碳化硅晶须掺杂石墨阴极(黑线)和纯石墨阴极(红线)1000个脉冲发射后实验测得的二极管电流 I_m 与由(1)式计算得到的位移电流 I_d

Fig. 4. The comparison between experimental measured current I_m and displacement current I_d calculated by equation (1) after 1000 pulses treatment for SiC whiskers doped-graphite cathode(black line) and graphite cathode(red line).

硅晶须掺杂石墨阴极产生的微波脉宽约 (25.8 ± 0.3) ns,增加了约11%. 碳化硅晶须的存在,可为爆炸发射提供更多的发射中心,在一定程度上可提高电子发射的均匀性,从而有利于输出微波起振点的提前. 此外,碳化硅晶须掺杂后微波脉宽的增大还归因于脉冲缩短现象得到了抑制. 碳化硅晶须爆炸发射时产生的等离子体中含有Si离子,其质量远大于H离子,也大于C离子,等离子体膨胀速度降低. 由此,脉宽缩短现象得到抑制,表现为输出微波下降沿的推迟,脉宽增大. 因此,将碳化硅晶须掺杂到石墨中,不仅有利于阴极场发射的快速启动,还有利于输出微波脉宽的增大.

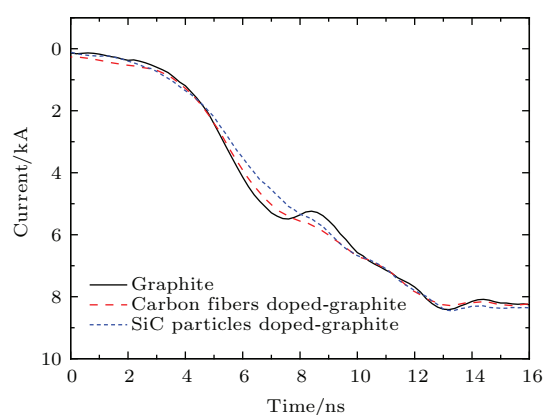


图5 纯石墨阴极、碳纤维掺杂石墨阴极和SiC颗粒掺杂石墨阴极1000个脉冲发射后实验测得的二极管电流曲线上上升沿

Fig. 5. Experimentally measured rise edge of diode current curves after 1000 pulses treatment for graphite cathode, carbon fibers doped-graphite cathode, and SiC particles doped-graphite cathode.

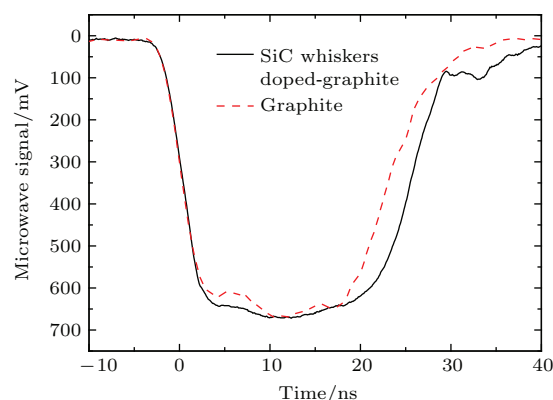


图6 碳化硅晶须掺杂石墨阴极和纯石墨阴极1000个脉冲发射后产生的微波波形对比

Fig. 6. Comparison of microwave waveforms between SiC whiskers doped-graphite cathode and graphite cathode after 1000 pulses treatment.

3.2 碳化硅晶须掺杂石墨阴极的电子发射性能及微观形貌的变化

图7对比了碳化硅晶须掺杂石墨阴极1000, 6000, 11000个数量脉冲发射后的二极管电流曲线. 可以看到, 随着脉冲发射数量的增加, 二极管电流大小无明显变化; 但是, 随着脉冲发射数量的增加, 其电流曲线上升沿曲线出现了较为明显的变化(如图7中黑色方框内所示).

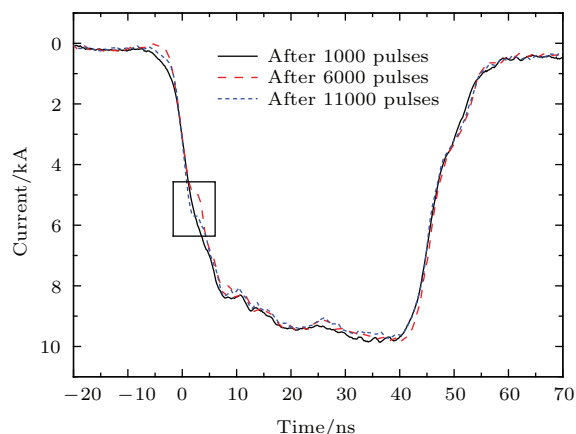


图7 碳化硅晶须掺杂石墨阴极1000, 6000, 11000个脉冲发射后实验测得的二极管电流波形

Fig. 7. Experimentally measured diode current waveforms after 1000, 6000, and 11000 pulses treatment for SiC whiskers doped-graphite cathode.

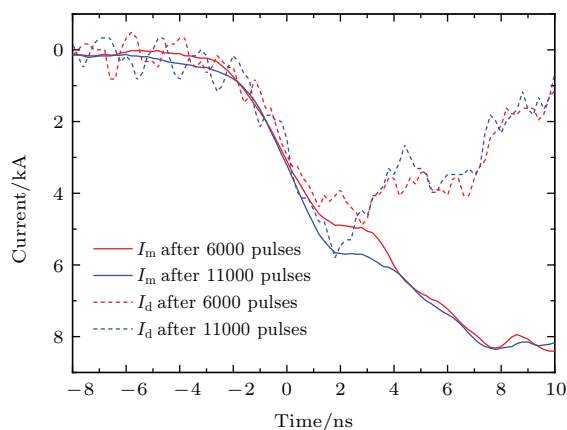


图8 碳化硅晶须掺杂石墨阴极6000和11000个脉冲发射后实验测得的二极管电流 I_m 与由(1)式计算得到的位移电流 I_d

Fig. 8. The comparison between experimental measured current I_m and displacement current I_d calculated by equation (1) after 6000 and 11000 pulses treatment for SiC whiskers doped-graphite cathode.

为了说明这些变化并不是实验测试误差导致, 图8对比了碳化硅晶须掺杂石墨阴极6000和11000个脉冲发射后实验测得的二极管电流 I_m 与由(1)

式计算得到的位移电流 I_d . 可以看到, 6000个脉冲和11000个脉冲发射后, 计算得到的位移电流最大值正好与实验测得电流曲线发生变化的拐点重合, 表明其电流曲线上升沿出现的变化确实源于位移电流. 由于1000个脉冲发射后电流曲线上未出现位移电流峰, 而6000个脉冲和11000个脉冲发射后都出现了位移电流峰, 因此, 随着脉冲发射数量增多, 阴极场发射启动速度减慢. 需要说明的是, 虽然纯石墨阴极电流曲线上升沿也出现位移电流峰, 但其与碳化硅掺杂阴极多次发射后电流曲线上升沿出现位移电流尖峰的机理不同. 前者是由于材料自身场发射阈值较高, 而后者可能是源于阴极表面微凸起形状因子的减小.

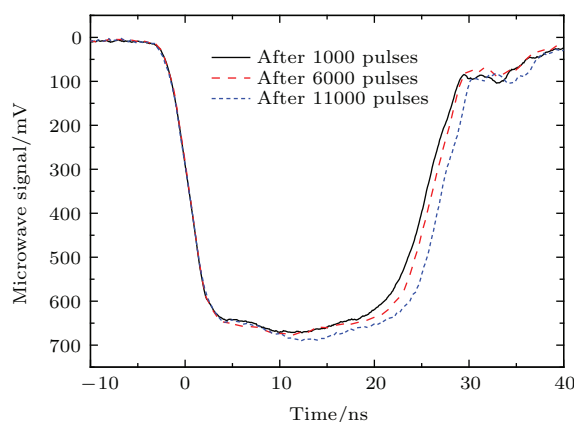


图9 碳化硅晶须掺杂石墨阴极1000, 6000和11000个脉冲发射后产生的微波波形曲线

Fig. 9. Microwave waveforms generated after 1000, 6000 and 11000 pulses treatment from SiC whiskers doped-graphite cathode.

图9对比了不同数量脉冲发射后输出的微波波形曲线. 6000和11000个脉冲发射后阴极产生的微波脉宽分别约为 (26.5 ± 0.3) ns 和 (27.0 ± 0.2) ns, 相比于1000个脉冲 (25.8 ± 0.3) ns, 11000个脉冲后产生的微波脉宽又增大了约5%. 在 10^3 — 10^4 个脉冲的范围内, 随着脉冲发射数量的增多, 输出微波的脉宽不断增大. 对于同一阴极, 在连续脉冲发射的前期, 由于整个二极管材料中存在吸附气体(水、真空泵油等), 阴极等离子的产生开始主要依赖于去吸附气体的电离, 阴极处气体电离产生的等离子体中主要成分为 H, C, O 等, 其膨胀速度较快, 很容易造成二极管间隙缩短和电子束半径的增大, 影响束波耦合关系, 造成输出微波脉冲缩短. 但是, 吸附气体的影响是有限的, Goebel^[22] 研究表明, 随着脉冲数量的增加, 二极管材料在电子发射过程

中的释气越来越少, 二极管真空度提高, 脉冲缩短现象越来越弱, 输出微波的脉宽不断增大, 直到约 1000 个脉冲后, 输出微波脉冲宽度达到最大. 本文中 6000 个脉冲后输出微波脉宽仍在增大, 这应该与电子发射均匀性的提高有关, 而电子发射的均匀性与阴极表面微观形貌息息相关.

图 10 对比了 11000 个脉冲发射前后阴极表面的微观形貌. 图 10(a) 和图 10(b) 显示, 制备态的阴极材料中, 直径约 $1\ \mu\text{m}$ 的碳化硅晶须以不同角度均匀分布于石墨基体, 石墨以片状晶粒为主, 形成了很多微凸起. 图 10(c) 和图 10(d) 显示, 11000 个脉冲发射后, 阴极表面微观形貌发生了很明显的变化: 棱角分明的碳化硅晶须端头变得较为圆润, 与表面呈一定角度分布的片状石墨晶粒变少, 阴极表面的碳化硅晶须和石墨均有明显的熔化痕迹, 表面出现了较多圆润的细小微点和蚀坑, 石墨晶粒黏结在了一起.

阴极表面微观形貌产生上述变化, 推断可能有以下三个方面的原因: 其一, 爆炸发射过程中等离子体的产生源于阴极表面发射微点的熔化或汽化. 由于发射微点的熔化和消耗, 使得爆炸发射对阴极表面有一定的“抛光”作用^[23,24]; 其二, 等离子体产生后发生扩散, 有一部分离子会反轰到阴极表面, 改变阴极发射表面的形貌; 其三, 阴极表面在热作用下熔化导致液滴的飞溅, 使得阴极表面出现蚀坑和新的微凸起^[25–28].

因此, 随着持续的脉冲发射, 阴极表面初始形状因子较大的微凸起逐渐被消耗, 场发射启动速度变慢, 实验测得的电流曲线上升沿相继出现位移电流峰; 而同时阴极表面微观形貌却变得更加均匀, 越来越多的微凸起可以同时参与到场发射和爆炸发射, 等离子体在阴极表面容易分布均匀, 从而得到更加均匀的电子束, 其宏观上的表现就是微波起振点的提前, 使得输出微波脉宽增大.

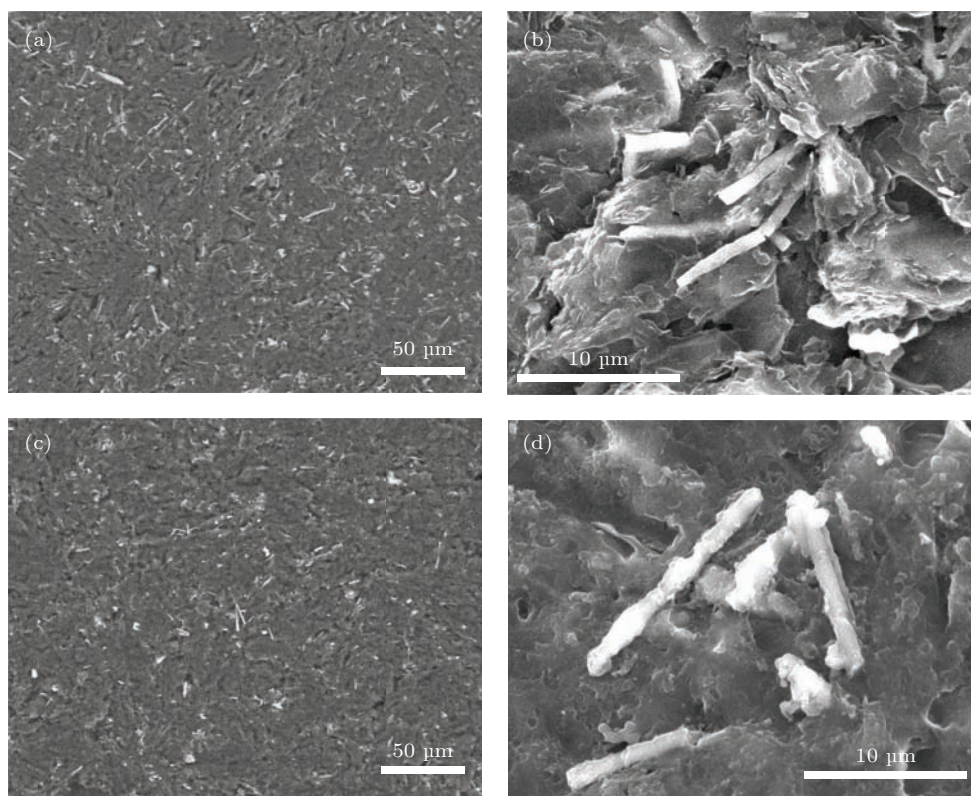


图 10 11000 个脉冲发射前后碳化硅晶须掺杂石墨阴极表面微结构对比 (a) 发射前背散射电子像; (b) 发射前二次电子像; (c) 发射后背散射电子像; (d) 发射后二次电子像

Fig. 10. Comparison of surface microstructures for SiC whiskers doped-graphite cathode: backscattered electron image (a) and secondary electron image (b) before emission, backscattered electron image (c) and secondary electron image (d) after 11000 pulses treatment.

4 结 论

本文通过对比碳化硅晶须掺杂前后石墨阴极1000个脉冲下的二极管电流曲线上升沿变化和输出微波脉宽变化,分析了碳化硅晶须在电子发射过程中的作用机理.碳化硅晶须掺杂后,电流曲线上升沿的位移电流峰消失,说明碳化硅晶须确实具有加快场发射启动速度的作用.碳化硅晶须掺杂石墨阴极爆炸发射产生的Si等离子体膨胀速度低,脉冲缩短现象得到抑制,使得其具有比纯石墨阴极更大的输出微波脉宽.综上所述,碳化硅晶须的掺杂,在加快阴极场发射启动速度的同时,增大了输出微波脉宽,有利于提高HPMS的能量转换效率,是提高阴极电子发射性能的有效途径.

通过分析碳化硅晶须掺杂石墨阴极 10^3 — 10^4 个脉冲下的二极管电压电流曲线和输出微波脉宽变化规律,研究了阴极表面微观形貌对其电子发射性能的影响机理.随着脉冲发射数量的增多,碳化硅晶须掺杂石墨阴极表面被等离子体不断“抛光”,电流曲线上升沿出现位移电流峰,表明阴极场发射启动速度减慢;同时,“抛光”效应使得阴极表面微观形貌均匀化,有利于输出微波起振点提前,输出微波的脉宽不断增大;吸附气体的不断释放,有利于抑制脉冲缩短现象的产生,从而推迟微波下降沿.

参考文献

- [1] Benford J, Swegl J A, Schamiloglu E (translated by Jiang W H, Zhang C) 2009 *High Power Microwaves* (2nd Ed.) (Beijing: National Defense Industry Press) p35 (in Chinese) [本福德J, 斯威格J A, 谢米洛格鲁E 著(江伟华, 张驰 译) 2009 高功率微波 (第二版) (北京: 国防工业出版社) 第35页]
- [2] Sun J 2006 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [孙钧 2006 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [3] Zhang Y H, Song F L, Xiang F, Kang Q, Luo M, Gong S G 2008 *High Power Laser Particle Beams* **20** 863 (in Chinese) [张永辉, 宋法伦, 向飞, 康强, 罗敏, 龚胜刚 2008 强激光与粒子束 **20** 863]
- [4] Jin Z X, Zhang J, Lei Y, Qian B L, Fan Y W, Zhou S Y 2011 *High Power Laser Particle Beams* **23** 1307 (in Chinese) [靳振兴, 张军, 雷应, 钱宝良, 樊玉伟, 周生岳 2011 强激光与粒子束 **23** 1307]
- [5] Krasik Y E, Dunaevsky A, Gleizer J Z, Felsteiner J, Kotov Y A, Sokovnin S Y, Balezin M E 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 9385
- [6] Bykov N M, Gubanov V P, Gunin A V, Ksrovin S D, Kutenkov O P, Landl V F, Polevin S D, Rostov V V, Mesyats G A, Zagulov F Y 1995 *Proceeding of the 10th IEEE International Pulsed Power Conference* Albuquerque, NM, USA, July 3–6, 1995 p71
- [7] Gunin A V, Landl V F, Korovin S D, Mesyats G A, Pegel I V, Rostov V V 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 537
- [8] Korovin S D, Rostov V V, Polevin S D 2004 *Proc. IEEE* **92** 1082
- [9] Shiffler D, Ruebush M, Zagar D, LaCour M, Golby K 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1592
- [10] Roy A, Patel A, Menon R, Sharma A, Chakravarthy D P, Patil D S 2011 *Phys. Plasmas* **18** 103108
- [11] Shiffler D, Ruebush M, Zagar D, LaCour M, Golby K, Umstattd R, Clark M C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2871
- [12] Russell C R 1967 *Elements of Energy Conversion* (London: Pergamon Press) p305
- [13] Qin Y X, Hu M 2008 *Appl. Surf. Sci.* **254** 3315
- [14] Puchkarev V F, Mesyats G A 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 5633
- [15] Sun J, Wu P, Huo S F, Tan W B, Shao H, Chen C H, Liu G Z 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 2179
- [16] Huo S F 2011 *M. S. Thesis* (Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology) (in Chinese) [霍少飞 2011 硕士学位论文(西安: 西北核技术研究所)]
- [17] Wu P, Huo S F, Sun J, Chen C H, Liu G Z 2015 *Phys. Plasmas* **22** 083104
- [18] Wu P, Sun J, Ye H 2015 *Phys. Plasmas* **22** 063109
- [19] McBride R D, Jennings C A, Vesey R A, Rochau G A, Savage M E, Stygar W A, Cuneo M E, Sinars D B, Jones M, LeChien K R, Lopez M R, Moore J K, Struve K W, Wagoner T C, Waisman E M 2010 *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **13** 120401
- [20] Gong Y B, Zhang Z, Wei Y Y, Meng F B, Fan Z K, Wang W X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3990 (in Chinese) [宫玉彬, 张章, 魏彦玉, 孟凡宝, 范植开, 王文祥 2004 物理学报 **53** 3990]
- [21] Benford J, Benford G 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 2
- [22] Goebel D M 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 3
- [23] Fursey G N, Polyakov M A, Shirochin L A, Saveliev A N 2003 *Appl. Surf. Sci.* **215** 286
- [24] Korovin S D, Litvinov E A, Mesyats G A, Rostov V V, Rukin S N, Shpak V G, Yalandin M I 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 1771
- [25] Mesyats G A (translated by Li G Z) 2007 *Vacuum Discharge Physics and High Power Pulse Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) pp297–298 (in Chinese) [米夏兹G A 著(李国政 译) 2007 真空放电物理和高功率脉冲技术(北京: 国防工业出版社) 第297—298页]
- [26] Mesyats G A, Zubarev N M 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 043302
- [27] Mesyats G A 1995 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **23** 879
- [28] Barengolts S A, Mesyats G A, Shmelev D L 2003 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **31** 809

Influence of surface microstructure on explosive electron emission properties of graphite cathode doped by silicon carbide whiskers

Hua Ye¹⁾ Wan Hong^{1)†} Chen Xing-Yu¹⁾ Wu Ping²⁾ Bai Shu-Xin¹⁾

1) (School of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 14 January 2016; revised manuscript received 9 April 2016)

Abstract

Explosive emission cathode (EEC) is a pivotal component in high power microwave source (HPMS), of which the ultimate properties are significantly dependent on the quality of electron beams generated from the cathode. Short lifetime and poor emission uniformity are the persistent drawbacks of conventional field EEC. Improvement of cathode material by changing its compositions and modifying surface micromorphology, is a feasible way to solve this problem. Graphite is one of the frequently used materials for EECs due to its long life-time and sturdy performance under high voltage and repetition frequency. Meanwhile silicon carbide (SiC) whiskers are distinguished by high aspect ratio (ratio of height to diameter) and low work function which is in favor of the fast onset of electron emission. In this work, the novel composites, composed of SiC whiskers, pitch and major graphite powders, are prepared by the conventional mingling and sintering. The cathodes are installed on TPG1000 system with a parameterized pulse of 970 kV, 9.2 kA, and 50 ns. By analyzing the changes of the rise edge of measured diode current and output microwave pulse duration, the effects of material composition and surface micromorphology on electron emission properties for the cathode are disclosed in detail. The results, based on the comparison of emission properties between graphite cathodes with and without SiC whiskers doped, reveal that SiC whiskers play an important role in accelerating the field emission of cathode, which is demonstrated by the eclipse of displacement current peak on the rise edge of measured current waveform after doping. Meanwhile, the duration of output microwave pulse is enhanced by about 11% after doping, which could be explained by the lower expansion speed of Si plasma. Moreover, the surface micro-protrusions of graphite cathode doped by SiC whiskers are constantly “polished” by heating effect and cathode plasma as the number of emission pulses increases to 11000. This is in quite good agreement with the appearance of the displacement current peak on the rise edge of measured current curves after 6000 and 11000 pulses treatment. These changes imply that the initial speed of field emission from cathode is slowed down gradually. The output microwave pulse starts early, which is benefited from the homogeneous surface micromorphology of the cathode due to “polishing” effect. The quantity of releasing absorbed gases, including water and vacuum pump oil vapor, decreases with increasing emission pulses. Then the pulse shortening phenomenon is restrained and the falling edge of output microwave pulse is extended. The duration of output microwave pulse is increased by about 5%, for graphite cathode doped by SiC whiskers after experiencing 11000 pulses. In conclusion, the reaction mechanism of SiC whiskers in the process of explosive electron emission (EEE) is considered as being due to accelerating the onset of field emission and reducing the expansion speed of cathode plasma. Therefore, combination with SiC whiskers is an effective way to improve the electron emission properties of graphite EECs, especially in the output microwave pulse width and energy conversion efficiency of HPMS.

Keywords: surface microstructure, silicon carbide whisker, electron emission property, microwave pulse duration

PACS: 81.05.Uf, 81.07.Gf, 52.80.Qj

DOI: 10.7498/aps.65.168102

† Corresponding author. E-mail: wanhong@nudt.edu.cn