

# 爆炸发射阴极特性的研究进展

宋法伦<sup>†</sup> 金晓 张永辉 向飞

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

**摘要** 文章对爆炸发射阴极的物理机制进行了阐述,着重对爆炸发射阴极的各种特性进行了介绍,包括阈值电压、发射均匀性、等离子体闭合速率、阴极寿命等.并且对研究爆炸发射阴极特性所采用的理论和测量方法进行了介绍,给出了目前阴极材料使用中存在的问题.

**关键词** 爆炸发射,阴极材料,二极管

## An overview of the properties of explosive emission cathodes

SONG Fa-Lun<sup>†</sup> JIN Xiao ZHANG Yong-Hui XIANG Fei

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The physical mechanism of explosive emission cathodes is reviewed. The properties of these cathodes are introduced in detail, including the threshold voltage, uniformity, plasma closure velocity, and life time. The experimental methods used in their study are also described, and some suggestions to improve their properties are given.

**Keywords** explosive emission, cathode material, diode

### 1 引言

爆炸发射阴极在许多高电压( $>300\text{kV}$ )、大电流( $>1\text{kA}$ )电子束驱动源系统中被广泛应用,如高功率微波产生<sup>[1]</sup>、自由电子激光、受激准分子激光抽运及表面改性等.文献中经常研究和报道的阴极发射材料包括石墨<sup>[2]</sup>、碳毡<sup>[3]</sup>、金属<sup>[4]</sup>(如不锈钢、铜、铝、钼等)、金属氧化物<sup>[1]</sup>以及一些介质纤维,如天鹅绒<sup>[5]</sup>、碳纤维<sup>[6]</sup>等.阴极材料的选择是设计和建立高功率微波源最关键的问题之一.美国在高功率微波源研究方面取得了较快的发展,在阴极材料方面进行了大量的研究.俄罗斯建立了一系列脉冲高功率微波源装置,他们在爆炸发射阴极技术研究中也取得了重大进展<sup>[7]</sup>.

爆炸发射阴极有很多优点:简单、易用、需要较少的辅助设备,它是目前唯一能提供几  $\text{kA}/\text{cm}^2$  发射电流密度的阴极.但它们也有严重的缺点和局限性.爆炸发射阴极研究中主要存在3个问题<sup>[1]</sup>(1)等离子体间隙的闭合问题.通常从阴极发射出来的等离子体是极不均匀的,特别是钢和石墨阴极,等离子体以热斑的形式沿轴向和径向快速移动,这相当

于减小了阴、阳极之间的有效间隙,从而引起阴极二极管阻抗变化,因而减弱慢波结构中的束波耦合;(2)等离子体的不均匀发射以及发射的不可重复性.由于阴极表面存在微突起,局部区域将先电离成为等离子体,从而使得束流发射不均匀;(3)脉冲持续过程中或者其后的材料放气问题.在一定的抽气速度下,阴极材料放气限制了脉冲的重复频率和脉冲宽度.在整个脉冲串的任一点,随着材料的放气,中性背景气体压力不断增加,引起电弧,从而使二极管短路.要抑制放气,就要求使用低放气速度的材料,或者通过真空处理工艺来减少运行中的放气.

为了获得较长脉冲的电子束源,必须解决爆炸发射阴极存在的问题或使用其他强流阴极技术.因此寻找等离子体扩散速度低、发射电流密度高、寿命长的阴极材料将会大大提高电子束源的性质.本文将综述国内外对爆炸发射阴极特性的研究结果,从中寻求不同阴极材料的特性以及阴极材料研究的方法,从而为进一步提高阴极材料的特性以及研究新型阴极材料奠定基础.

2006-10-29 收到初稿,2006-11-23 收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: emplasma@ustc.edu

## 2 爆炸发射的物理机制

当在二极管阴阳极间加上强纵向脉冲电压时,在阴极表面微突起处会产生强的电场,从而发生场致发射,从微突起处产生的强电子流对这些不均匀点进行欧姆加热,最终将他们气化并产生作为零逸出功电子源的等离子体.在外加电场的作用下,等离子体中的电子被不断加速通过阴阳极间隙.在这个物理过程中,存在两种点火机制<sup>[8]</sup>,即尖端场增强和表面闪烙.

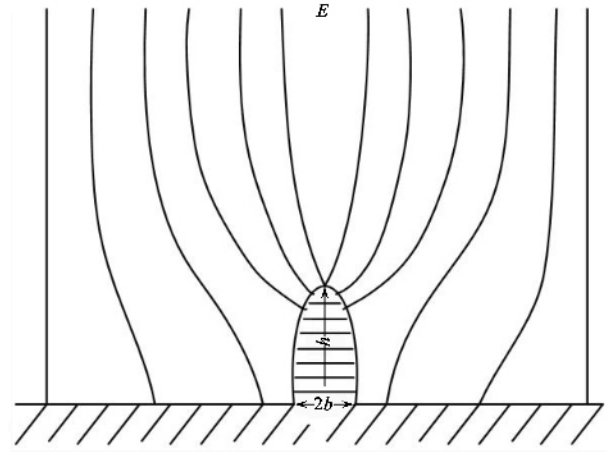


图1 尖端场增强示意图

### 2.1 尖端场增强

对于金属阴极表面,尖端场增强是主要的点火机制.基于传导电子通过金属表面势垒的量子力学隧道效应,当外强电场加在金属表面时,势垒的宽度将减小,从而使得电子能够很容易地通过隧道.一旦电子通过势垒隧道,它将变成自由电子.电子通过典型的1nm宽的势垒估计需要的电场强度约为 $3 \times 10^7$  V/cm.然而,在许多实际的例子中,阴极表面电子的发射发生在间隙场,其需要的阈值场远低于 $3 \times 10^7$  V/cm.例如,在真空间隙中,经常在场强强度约为 $10^5$  V/cm时观察到预击穿电流<sup>[9]</sup>.引起这种差别的原因是电极表面远非平面,而是存在各种微突起,如图1所示.当高压加在间隙上时,场强线将聚集在微突起的尖端,因此尖端局域场明显增强.对于像针一样的几何形状,在微突起尖端的局域场比微间隙场大2个量级.这解释了在场强度约为 $10^5$  V/cm时观察到预击穿电流的原因.然而,这个过程只是对当外部电场打开时的初始状态起重要作用,当场发射过程发生时,由于焦耳加热,微突起将被快速蒸发,爆炸电子发射将起突出的作用.

(4)等离子体柱以正比于气体温度平方根的速度进行扩散 (5)等离子体以步骤4中的最终温度决定的特征速度不断膨胀扩散到阴阳极间隙.

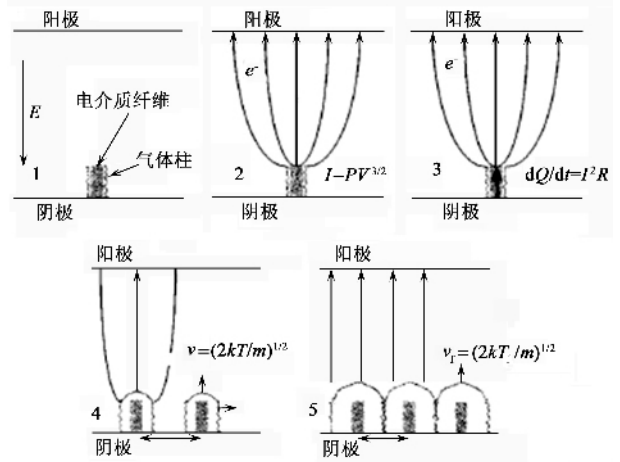


图2 天鹅绒阴极表面闪烙爆炸发射的理论模型<sup>[5]</sup>

### 2.2 表面闪烙

通常,对于如天鹅绒等具有微小突起的介电阴极表面,表面闪烙是主要的点火机制. Miller 对天鹅绒阴极的发射机制进行了详细的理论和实验研究<sup>[5]</sup>,他认为,表面闪烙是介质纤维的主要点火机制.通常表面闪烙点火爆炸发射机制包含以下5个步骤(如图2所示)(1)当加载在纤维上的电场超过电子发射阈值时,表面闪烙现象产生,表面闪烙产生了一个稠密柱状冷等离子体(2)外加的电场将空间电荷限制电子流从等离子体柱中提取出来;(3)流经等离子体柱的电流对气体进行阻抗加热;

## 3 阴极特性

### 3.1 二极管特性曲线

阴极是二极管的重要组成部分,阴极特性的直观表现就是阴极发射电子束的电压、电流随时间变化的特性曲线.典型的二极管电压、电流随时间变化的曲线如图3所示.通常,电压随时间变化特性用电阻分压器<sup>[10]</sup>或电容分压器进行测量,而电流随时间变化特性用 Rogowski 线圈进行测量,也可以用其他电流监测器进行测量,如 Pearson 电流监测器等.电容或电阻分压器及电流测量线圈是经典的电压、电流测量方法,其原理简单,响应较快,功率较大,测量失真率小,在高压、强流电磁实验系统中被广泛应

用.

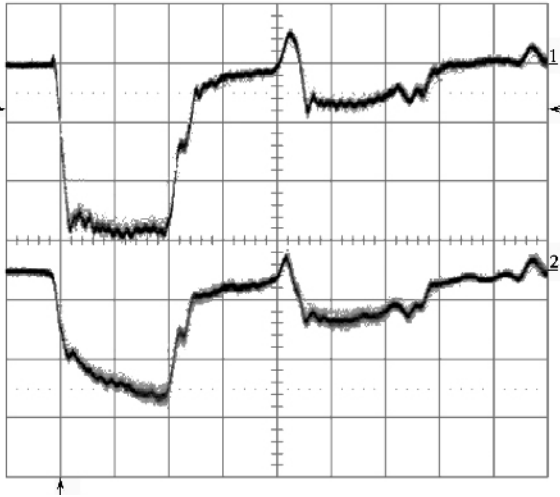


图3 典型的二极管电压、电流随时间的变化曲线(横坐标为时间值,纵坐标为电压、电流的幅值,1为电压曲线,2为电流曲线)

### 3.2 阴极发射电压阈值

不同的阴极材料具有不同的发射电压阈值,电压阈值与表面势垒相关.加载相同的电压时,较低的电压阈值具有相对较强的电子发射能力.Litz对几种不同材料的阴极特性进行了研究<sup>[11]</sup>,如表1所示.研究表明,碳纤维阴极具有最低的发射电压阈值,导通平均电场为10—15kV/cm,天鹅绒导通电场在30—40kV/cm之间,碳块的导通电场在50—60kV/cm之间.天鹅绒阴极具有最好的重复性,阴极表面导通时间的变化小于5%.而Miller的研究结果表明<sup>[5]</sup>,天鹅绒阴极的发射阈值电场为16kV/cm.两者得到的天鹅绒阴极发射电压阈值有所差异,可能与其使用的天鹅绒材料有关.

表1 不同阴极材料发射电压阈值与等离子体闭合时间(阴、阳极之间的间隙为1cm)及平均电流密度

阴极	发射电压阈值/kV	等离子体闭合时间/ns	平均电流密度/(A/cm <sup>2</sup> )
碳纤维-A	10	1000	130
碳纤维-B	30	750	200
天鹅绒-A	35	500	100
天鹅绒-B	55	350	130
光滑碳-A	55	250—400	90
横切碳-A	60	400	90
横切碳-B	55	300—400	160
金刚石涂层横切碳-B	80	350	110
钨-A	130	180	50
铌	45	200	100

### 3.3 延迟时间

在电流开始流入晶须与由于焦耳加热晶须爆炸

的时刻之间总存在一个时间间隔,这个时间间隔称之为尖端爆炸延迟时间.尖端爆炸延迟时间是与真空间隙的击穿延迟时间紧密相关的,而电子束通常在真空击穿延迟时间内产生.延迟时间与阴极材料的电阻率成反比,因此对于高电阻率的阴极来说,真空二极管的击穿延迟时间会明显减小.图4给出了几种不同材料的击穿延迟时间的结果<sup>[9]</sup>,这几种材料均可用作阴极材料.从图中可以看出,绝缘材料天鹅绒在这方面具有最好的特性.实验中,可根据不同的实验环境,综合材料的各种特性选择合适的阴极材料.

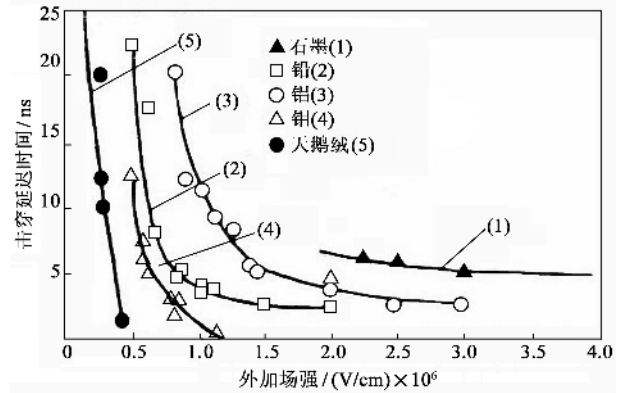


图4 不同阴极材料击穿延迟时间与外加电场的关系

### 3.4 发射均匀性

电子束均匀性的测量分为径向均匀性和轴向均匀性.Krasik等<sup>[10]</sup>用X射线快速成像技术对电子束的轴向均匀性进行了研究,如图5所示,并且采用法拉第杯阵列对电子束的径向非均匀性进行了测量.易爱平等根据电子束打在有机玻璃板上的痕迹来判断电子束径向发射的均匀性<sup>[12]</sup>,而电子束轴向均匀性的测量采用荧光成像法,即把电子束在气体中碰撞产生的荧光进行成像的定性诊断方法.不论X射线成像或者荧光成像,它们只能定性判断径向的非均匀性.实验结果表明<sup>[11]</sup>,天鹅绒阴极具有很好的发射均匀性,并且发射的重复性很好.对于具有相同发射阈值的不同类型的碳阴极,其阴极发射均匀性不同,这与它们的表面特征及其结构特性相关.

### 3.5 平均电流密度

电子束电流密度是阴极发射性能的重要标志.俄罗斯在爆炸发射阴极技术研究中取得了重大进展,在短脉冲情况下,利用石墨阴极得到了10<sup>3</sup>—10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>的电流密度<sup>[7]</sup>.Litz的研究结果表明<sup>[11]</sup>,如表1所示,碳纤维阴极具有最大的平均电流密度

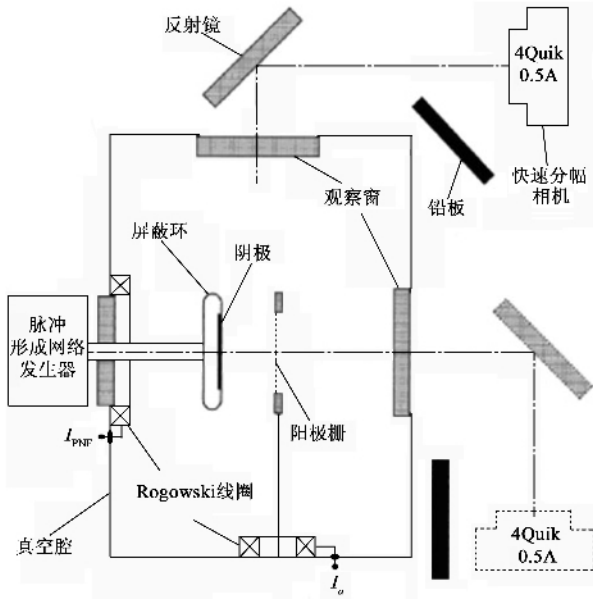


图5 实验装置示意图

( $150\text{A}/\text{cm}^2$ ) 峰值密度达到  $350\text{A}/\text{cm}^2$ . 天鹅绒阴极的平均电流密度约为  $100\text{A}/\text{cm}^2$ . 天鹅绒和碳纤维的测量数据具有重复性. 横切碳阴极的电流密度约为光滑碳阴极的 1.5 倍. 金刚石涂层横切碳的电流密度与纯横切碳的电流密度相同. 这说明相同材料阴极的电子发射能力与其形状有关.

### 3.6 空间电荷限制流

由爆炸发射的物理机制可知,在阴极表面微突起处会形成具有零功函数的电子发射体,即阴极等离子体,电子流很容易从等离子体中提取,它主要受阴、阳极间隙中空间电荷云的限制. 对于一个平面间隙,电流密度受 Child - Langmuir 公式的限制<sup>[9]</sup>,即

$$J = \frac{4\varepsilon_0}{9} \left( \frac{2e}{m_0} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{d^2}, \quad (1)$$

其中  $\varepsilon_0$  为自由空间中的介电常数,  $e$  和  $m_0$  分别为电子的电荷和静止质量,  $V$  为加载电压,  $d$  为阴、阳极间距. 在非相对论条件下 ( $V < 500\text{kV}$ ), 当阴、阳极间距  $D$  大于球形半径  $R$  时, 即  $D/R > 1$ , 刘国治等给出了球形阴极二极管的空间电荷限制流<sup>[13]</sup>:

$$I_s = 7.13 \times 10^{-6} (0.9 + 0.9 \frac{R}{D})^2 V^{3/2}. \quad (2)$$

由上式可知, 当  $D/R \gg 1$  时, 二极管电流只与加载电压相关.

### 3.7 有效间隙

由于阴极表面的爆炸发射过程和电子轰击阳极

表面形成的等离子体都可以沿轴向和径向扩散. 这相当于减小了阴、阳极之间的有效间隙, 从而引起二极管阻抗变化. 二极管有效间隙与等离子体扩散速率有关:  $d_{\text{eff}} = d_0 - v_c t$ , 其中  $d_{\text{eff}}$  为二极管有效阴、阳极之间的间隙,  $d_0$  为阴、阳极之间的几何间隙,  $v$  为阴极等离子体膨胀速率,  $t$  为等离子体作用时间. 二极管的阻抗特性与阴、阳极间隙相关, 要保持稳定的二极管阻抗特性, 就需要保持恒定的阴、阳极间隙, 这就要求等离子体的膨胀速率越小越好.

### 3.8 等离子体闭合速率

利用空间电荷限制流可以得到二极管等离子体闭合速率的信息. 二极管阻抗的表达式, 即加载电压和 Child - Langmuir 电流的比值可以写为

$$\frac{V}{I_e} = Z_{\text{th}} - \frac{(d_0 - v_c t)^2}{\frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} S_{\text{eff}} V^{1/2}}, \quad (3)$$

其中  $S_{\text{eff}}$  为有效发射面积, 束电压  $V$  和发射电流  $I_e$  可以由实验测量得到, 利用 (3) 式可以得到等离子体的闭合速率. 由于阴极有效发射面积可能并非常数, 从而可能对求得的等离子体闭合速率引入误差. 夏连胜等<sup>[14]</sup>通过所建立模型和大量实验数据给出了阴极等离子体膨胀速率为  $0.15\text{--}4\text{cm}/\mu\text{s}$ , 但脉冲过程中不均匀. 二极管间隙的闭合速度依赖于阴极表面的电场强度、阴极发射材料以及磁场等.

Miller 应用图 2 所示的物理模型, 给出了天鹅绒阴极等离子体的闭合速率为<sup>[5]</sup>

$$v(\text{m/s}) = 100 (d^*/d)^{2/3} V^{1/2}, \quad (4)$$

其中  $d^*$  为天鹅绒簇间距,  $d$  为阴、阳极间隙,  $V$  为二极管电压. 如果簇间距  $d^* \approx 0.1\text{cm}$ , 在  $500\text{kV}$  电压下,  $1\text{cm}$  间隙的闭合速率约为  $1.5\text{cm}/\mu\text{s}$ . 该模型预测值与文献中平面二极管实验数据符合得很好, 但与阴极杆的实验结果不符, 这可能是因为边缘场增强会加速间隙闭合速度的缘故.

### 3.9 有效发射面积

在爆炸发射过程中, 由于表面微突起会产生等离子体, 从而发射最初为局部电子发射, 因而阴极有效发射面积并非常量. 有效发射面积随时间的变化主要有三个阶段. 第一阶段为最初局部阴极等离子体形成过程, 此时有效发射面积逐渐增加; 第二阶段是局部阴极等离子体膨胀扩散过程, 此时有效发射面积迅速增加并逐渐趋于稳定; 第三阶段是阴极等离子体稳定发射过程, 此过程是有效发射面积基本

稳定的时期. 刘国治等<sup>[15]</sup>的研究结果表明, 阴极有效发射面积达到稳定的时间随阴、阳极间隙内电场的增加而减小, 当二极管阴、阳极之间的平均电场约为 100kV/cm 时, 阴极有效发射面积达到稳定的时间约为 20ns, 阴极有效发射面积相对电压波形的延迟时间随电场的变化近似呈指数衰减曲线.

### 3.10 阴极寿命

对于重复频率高功率微波源而言, 阴极寿命具有很重要的作用, 频繁更换阴极不利于工程化及实用性. 寻找寿命长、束流上升时间短、耐烧蚀以及发射电子稳定的阴极是重要的研究课题. 俄罗斯托姆斯斯克大电流研究所在短脉冲条件得到了石墨阴极的使用寿命达  $10^6$  次以上.

Litz 对碳纤维阴极的耐用性进行了测试<sup>[11]</sup>, 在 35000 次实验后, 在阴极表面没有观察到损蚀. 所有的电压、电流和法拉第杯信号保持良好的幅度和波形. 而对天鹅绒阴极进行了 4000 次实验后, 其电流波形已不再具有均匀性和重复性, 进行了 20000 次实验后, 天鹅绒阴极已被完全炭化变黑, 铝阴极基底的半径边缘暴露出来, 所有的天鹅绒和粘合剂已经蒸发. Shiffler 等的研究结果表明<sup>[16, 17]</sup>, 在 20000 次实验之后, 碘化铯涂层碳纤维阴极的电流波形没有表现出衰退现象, 此时还没有达到阴极寿命的极限. 而天鹅绒阴极在  $7000 \pm 105$  次实验后, 电流波形明显衰退. 目前, 电流衰退的原因还不清楚. 从外观上来看, 天鹅绒阴极看起来与实验前完全一样, 即使在显微镜下观察依然如此. 然而在化学成分上, 天鹅绒阴极损失了大量的硅. 在纺织品中, 硅是作为纺织软化剂应用. 硅对于电子特性的影响还不知道. 需要进行进一步的实验, 从而验证硅的损耗与阴极寿命关系的机制. 不过碘化铯涂层碳纤维阴极具有明显的长寿命.

### 3.11 阻抗特性

对于非相对论电子束, 设二极管阴极面积为  $A$ , 阴、阳极间距为  $d$ , 那么二极管阻抗可以写为<sup>[8]</sup>

$$Z = \frac{427}{\sqrt{V}} \left( \frac{d^2}{A} \right) (\Omega), \quad (5)$$

式中  $V$  为间隙电压, 单位为 MV. 实验上, 阻抗由电压除以电流获得. 通常, 在阴极寿命限制内, 阴极在外加电压下阻抗变化很小<sup>[18]</sup>. 然而, 如果超出阴极寿命限制后, 在外加电压不变的条件下, 阴极发射电流密度明显减小, 阴极阻抗特性将表现出明显增加.

如图 6 所示, 天鹅绒阴极在超出寿命限制后表现出持续的阻抗增加<sup>[16]</sup>.

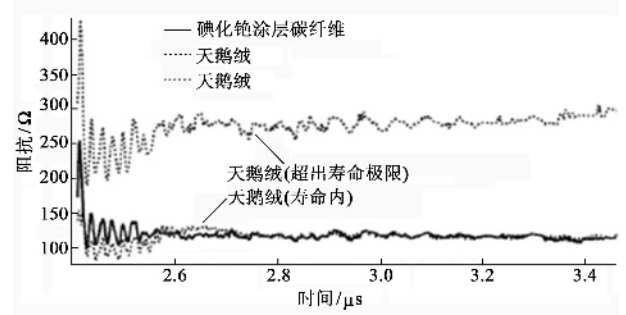


图 6 几种阴极材料二极管阻抗随时间的变化关系

### 3.12 气压特性

在阴极发射初始阶段, 二极管区域气压会明显增加, 气压的变化与阴极发射面积及真空泵抽运率相关. 气压的增长可能起因于阴极或者阳极表面的污染<sup>[19]</sup>, 如水蒸气等. 天鹅绒阴极等介质纤维阴极在爆炸发射过程中会释放出大量的物质, 也可能对真空造成影响, 在其寿命的早期, 这些物质是主要的表面污染物, 如从密集纤维阵列表面解吸附的水蒸汽和真空泵油, 还有纤维腐蚀物等; 在其寿命的晚期, 纤维腐蚀物是主要的表面污染物.

在一定的抽气速度下, 放气限制了脉冲的重复频率和脉冲宽度. 如果在一个平衡气压条件下操作二极管, 那么脉冲重复频率表达式须满足<sup>[5]</sup>

$$R < 330 v_{\text{eff}} / (A_c \tau), \quad (6)$$

其中重复率  $R$  单位为 Hz,  $v_{\text{eff}}$  为有效抽运率, 单位为 L/s,  $A_c$  为阴极面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $\tau$  为脉冲持续时间, 单位为 ns. 若脉冲持续时间为  $1 \mu\text{s}$ , 阴极面积为  $30 \text{cm}^2$ , 有效抽运率为  $100 \text{L/s}$ , 那么脉冲重复率将不大于  $11 \text{Hz}$ .

## 4 结论

本文对国内外爆炸发射阴极特性的研究进行了综述, 并且对几种常见阴极的参数特性进行了介绍. 各种试验研究表明, 在几种常见的阴极材料中, 如金属、石墨、天鹅绒、碳纤维等, 其各自均有局限性. 金属阴极虽然在低功率电子束源中具有较广泛的应用, 但由于其熔点和等离子体闭合速率等问题, 在高功率微波源技术中很少被应用; 石墨阴极的电子发射能量比碳纤维要低 1—2 个量级, 且不适用于大面积阴极; 天鹅绒阴极寿命短, 不适用于脉冲重复频率

电子束源,性能相对较好的碘化铯涂层碳纤维阴极,虽然其发射电流密度较大、等离子体闭合速率低,但在试验初始阶段发射不稳定,需要进行调节处理(conditioning process)<sup>[16]</sup>。

爆炸发射阴极正处在发展时期,需要对爆炸发射阴极的各种特性进行研究探索。由于等离子体的产生以及局部放电导致二极管短路是爆炸发射阴极需要解决的主要问题之一。随着脉冲重复频率高功率微波技术的不断发展,对电子束功率的要求越来越高,因而,如何进一步提高二极管阴极的电子发射能力,增加阴极使用寿命,提高重复工作频率及在长脉冲下降低等离子体的运动速度,是目前重复频率高功率微波源技术中亟待解决的难题。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Barker R J, Schamiloglu E. 高功率微波源与技术. 北京:清华大学出版社, 2005 [ Barker R J, Schamiloglu E, High-Power Microwave Sources and Technologies. Beijing :Tsinghua University Press, 2005( in Chinese ) ]
- [ 2 ] 马乔生,张永辉,常安碧. 强激光与粒子束 2005, 17( 4 ): 609 [ Ma Q S, Zhang Y H, Chang A B. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17( 4 ) 609 ( in Chinese ) ]
- [ 3 ] 马维义,王有田,黄德宝等. 强激光与粒子束, 1994, 6( 2 ): 255 [ Ma W Y, Wang Y T, Huang D B *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 1994, 6( 2 ): 255 ( in Chinese ) ]
- [ 4 ] Miller R B. An Introduction to the Physics of Intense Charge Particle Beams. New York :Plenum Press, 1982
- [ 5 ] Miller R B. J. Appl. Phys., 1998, 84( 7 ) 3880
- [ 6 ] Garate E, McWilliams R Voss D *et al.* Rev. Sci. Instrum., 1995, 66( 3 ) 2528
- [ 7 ] Alexander V G. Euro-Asia Pulsed Power conference, 2006, Tue - P 3, Chengdu
- [ 8 ] 杨建强,廖丹. 真空电子技术, 2004, 5 35 [ Yang J Q, Liao D. Vacuum Electronics, 2004, 5 35 ]
- [ 9 ] Pai S T, Zhang Q. Introduction to High Power Pulse Technology, Singapore ; World Scientific Co. Pte. Ltd., 1995
- [ 10 ] Krasik Y E, Dunaevsky A, Krokhmal A *et al.* J. Appl. Phys., 2001, 89( 4 ) 2379
- [ 11 ] Litz M S. Intense Microwave Pulses II, Proceedings SPIE, 1994, 2154 110
- [ 12 ] 易爱平,赵学庆,郭建明等. 强激光与粒子束, 2001, 13( 3 ): 369 [ Yi A P, Zhao X Q, Guo J M. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13( 3 ) 369 ( in Chinese ) ]
- [ 13 ] Liu G Z, Shao H. Chinese Physics, 2003, 12( 2 ) 204
- [ 14 ] 夏连胜,王勤,黄子平等. 物理学报 2004, 53( 10 ) 3435 [ Xia L S, Wang M, Huang Z P *et al.* Acta Phys. Sin., 2004, 53( 10 ) 3435 ]
- [ 15 ] 刘国治,孙钧,邵浩等. 强激光与粒子束, 2005, 17( 2 ) 249 [ Liu G Z, Sun J, Shao H *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17( 2 ) 249 ( in Chinese ) ]
- [ 16 ] Shiffler D, LaCour M, Golby K *et al.* IEEE Transactions on plasma science, 2001, 49( 3 ) 445
- [ 17 ] Shiffler D, LaCour M, Sena M *et al.* IEEE Transactions on plasma science, 2000, 28( 3 ) 517
- [ 18 ] Umstatted R J, Shiffler D, Haworth M D *et al.* SPIE Intense Microwave Pulses VI, 1999, 3702 277
- [ 19 ] Nation J, Mako F M. Proc. IEEE, 1999, 87( 5 ) 185



# 北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、实验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌、硫化锌、多光谱硫化锌等。



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜及其他常用棱镜。
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金及介质反射镜,直径5mm—200mm。
- 光学窗口:各种尺寸规格、材料的光学平面窗口,平晶,直径5mm—200mm。
- 各种有色玻璃滤光片:规格为直径5mm—200mm(紫外、可见、红外)及窄带干涉滤片。
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤 SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。

地址 北京市海淀区知春路49号希格玛大厦B座306室

电话 010-88096218/88096217 传真 010-88096216 网址 [www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

联系人 徐勇小姐 陈锦先生 施楠小姐

Email [xuyong@goldway.com.cn](mailto:xuyong@goldway.com.cn) [kevinchen@goldway.com.cn](mailto:kevinchen@goldway.com.cn) [shinan@goldway.com.cn](mailto:shinan@goldway.com.cn)