

强流电子二极管中阴极等离子体的膨胀*

夏连胜† 王 勳 黄子平 张开志 石金水 章林文 邓建军

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

(2003 年 5 月 29 日收到 2004 年 1 月 8 日收到修改稿)

研究了强流四脉冲条件下电子真空二极管中阴极等离子体产生、膨胀和由于阴极等离子体膨胀导致二极管短路现象,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 $0.5\text{--}4\text{cm}/\mu\text{s}$,且脉冲过程中不均匀.分析了阴极等离子体膨胀对真空二极管电压、阻抗的影响和对多脉冲强流电子束参数的影响,并给出初步解决方案.

关键词:多脉冲二极管,阴极等离子体,膨胀速率

PACC:5260,5275P,5280Q

1. 引言

强流真空电子二极管是一种可以利用场发射的方法获得脉冲电流为数 kA 到数 MA 量级的电真空装置,在强流加速器^[1]、高功率微波^[2]等领域得到广泛应用.强流电子真空二极管中,由于阴极材料气化和离子化等因素产生了阴极等离子体^[3,4].阴极等离子体以一定速度向阳极运动,改变二极管阴阳极间实际间隙大小,并影响进一步引出电子束时二极管状态,从而影响引出束参数.有研究表明^[5],当引出电子束脉冲宽度在数十 ns 时,由于阴极等离子体膨胀速率较小,对引出束参数影响较小.然而,当引出束脉冲宽度达 μs 量级或引出连续猝发短脉冲时,阴极等离子体运动对引出束参数影响则不可忽略.

2. 阴极等离子体的产生

在本研究中,四脉冲强流电子束源是将一台电子能量 2MeV 单脉冲强流直线感应加速器注入器^[1]改造后获得的(见图 1).该注入器包括 8 个感应组元,阴极和阳极端各 4 个,每个感应组元经激励后可提供脉冲电压幅度为 250kV.通过阴极杆和阳极杆将阴阳极各 4 个脉冲高压串接叠加在二极管上.改造后,该注入器可以产生二极管电压脉冲数为 4 个,

脉冲间隔分别为 480ns, 480ns, 440ns.电压脉冲宽度(FWHM)120ns,脉冲上升时间 30ns(10%—90%),最高二极管脉冲电压为 500kV.真空二极管结构为有箔平面型二极管,其间隙可以在 30mm 到 120mm 间连续调节.阳极平面直径为 230mm,阳极钨网直径为 40mm.阴极平面直径为 300mm,发射面直径为 70mm.

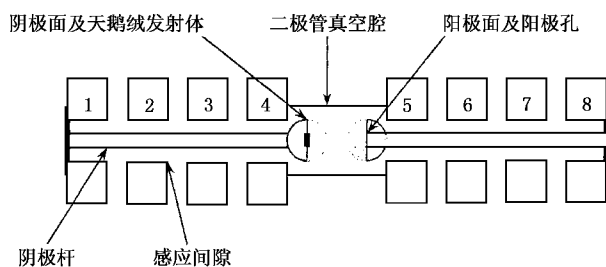


图 1 四脉冲强流电子束源结构示意图 4 个激励脉冲按时序分别激励感应腔 1, 5, 2, 6, 3, 7 和 4, 8 而获得 4 个脉冲二极管电压

阴极发射体是天鹅绒.天鹅绒阴极是一种吸附气体加强型场发射阴极^[6],发射阈值较低,发射均匀性较好,是一种常用的强流电子束发射体^[7,8].图 2 是 CCD 相机获得的阴极面发光情况照片.图 2(a)是本底照片,图中右边被照亮的椭圆是被照亮的粘有天鹅绒发射体的阴极面,左边为阳极面.图 2(b)是几次实验获得的阴极面等离子体分布情况.发射体上有很多因为产生等离子体而发亮的光点,并且等

* 国防科技预研经费资助的课题.

† E-mail: lsh-xia@yahoo.com.cn, 电话 (0816) 2484140.

离子体点源并不均匀,位置也不固定.从图中可以看出,天鹅绒阴极发射实际并不很均匀.

图3是一次实验得到的4个高电压脉冲波形(通道1,2)和阴极发射电流波形(通道3).脉冲1,2,3,4的电压幅度分别为490kV,480kV,454kV,440kV.

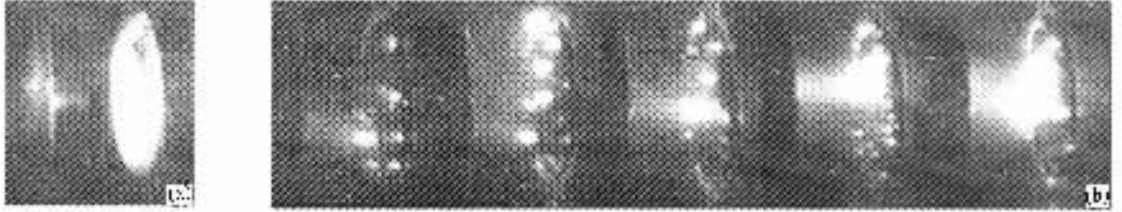


图2 阴极等离子体的 CCD 图像 (a)本底图像 (b)5次实验获得的阴极等离子体图像

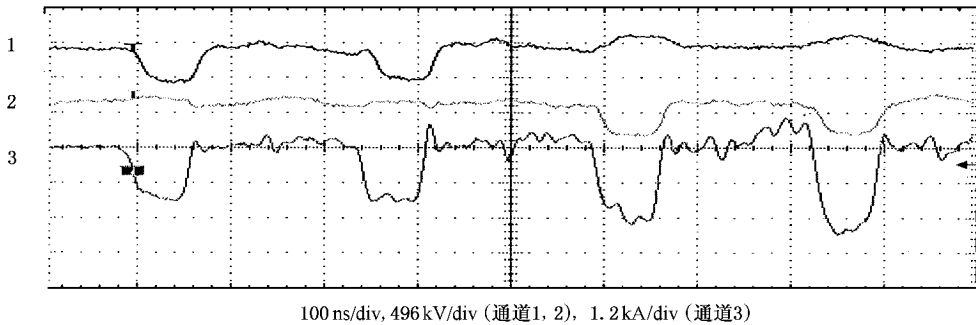


图3 实验获得的脉冲电压、发射电流波形图(通道1是第1,2个电压脉冲波形,通道2是第3,4个电压脉冲波形,通道3是4个发射电流脉冲波形,100ns/div,496kV/div(通道1,2),1.2kA/div(通道3))

3. 阴极等离子体膨胀速率

导致二极管分布电容和发射电流随脉冲序数增大的原因是二极管区阴极等离子体的存在并膨胀,使二极管有效间隙变小,

$$d_{\text{eff}} = d_0 - v_c t, \quad (1)$$

式中 d_{eff} 为二极管有效阴阳极间隙, d_0 为阴阳极几何间隙, v_c 为阴极等离子体膨胀速率, t 为等离子体作用时间,其起始时刻为第1个电流脉冲开始发射时刻.有文献表明阴极等离子体膨胀速度为 $1\text{--}6\text{cm}/\mu\text{s}$ ^[9].阴极等离子体膨胀导致产生的后果是二极管电压不一致,这将导致注入器输出多脉冲电子能量和束流大小不一致,束流脉冲间差异将给束流运输带来困难.

真空强流二极管电流是空间电荷限制流.阴极等离子体膨胀速度可以采用空间电荷限制流进行估算.由于阴极边缘发射等因素的存在,给发射面确定

带来一定困难.可以取一等效发射面,并假定等效发射面和等效阳极面一致.这一假设依据是阴阳极面比电子发射面大很多,二极管区电场是均匀的,束流横向运动分量很小,束流基本是平直柱形束.则有^[10]

$$P = \frac{I_e}{V_d^{3/2}} = \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2e}{m_e} \right)^{1/2} \left(\frac{\pi r_{a,\text{eff}}^2}{d_{\text{eff}}^2} \right), \quad (2)$$

式中 P 是二极管导流系数, $r_{a,\text{eff}}$ 是有效阳极孔半径, d_{eff} 是二极管有效间隙, V_d 是二极管电压, I_e 是发射电流.第一个脉冲发射时,取 d_{eff} 等于实际二极管几何间隙 d_0 .由 I_e , V_d , d_{eff} 可以算出 $r_{a,\text{eff}}$.再假定 $r_{a,\text{eff}}$ 在不同脉冲过程中保持不变,由每个脉冲过程的 I_e , V_d 可以求出 d_{eff} .

利用上述假设,得到不同间隙和导流系数条件下阴极等离子体膨胀速率.当二极管极间隙为55mm时,由多次实验数据,在二极管电压有所差异条件下,计算出四个脉冲间等离子体膨胀平均速率分别为 $0.98\text{cm}/\mu\text{s}$, $3.86\text{cm}/\mu\text{s}$ 和 $1.90\text{cm}/\mu\text{s}$,总的脉冲过

程中平均速率为 $2.19\text{cm}/\mu\text{s}$. 当二极管极间隙距离为 70mm 时, 由多次实验数据, 计算出四个脉冲间等离子体膨胀平均速率分别为 $1.31\text{cm}/\mu\text{s}$, $2.26\text{cm}/\mu\text{s}$ 和 $2.73\text{cm}/\mu\text{s}$, 总脉冲过程中平均速率为 $1.93\text{cm}/\mu\text{s}$. 当二极管极间隙为 85mm 时, 计算出四个脉冲间等离子体膨胀平均速率分别为 $0.77\text{cm}/\mu\text{s}$, $2.88\text{cm}/\mu\text{s}$ 和 $0.91\text{cm}/\mu\text{s}$, 总脉冲过程中平均速率为 $1.22\text{cm}/\mu\text{s}$. 表 1 是三种不同二极管间隙条件下典型的实验结果.

表 1 不同二极管间隙条件下导流系数、有效二极管间隙及阴极等离子体运动速率

(a) ($20^\#$) 二极管阴阳极初始间隙为 55mm

| | 脉冲 1 | 脉冲 2 | 脉冲 3 | 脉冲 4 |
|---|------|----------------|----------------|----------------|
| I_e/kA | 2.08 | 2.64 | 3.87 | 5.19 |
| U_d/kV | 401 | 454 | 278 | 246 |
| $P/\mu\text{perv}$ | 8.19 | 8.63 | 26.40 | 42.54 |
| d_{eff}/cm | 5.50 | 5.36 | 3.06 | 2.41 |
| $v_e/(\text{cm}/\mu\text{s})$ ($v_{\text{平均}}$) | 2.21 | (v_1) 0.29 | (v_2) 4.79 | (v_3) 1.48 |

(b) ($33^\#$) 二极管阴阳极初始间隙为 70mm

| | 脉冲 1 | 脉冲 2 | 脉冲 3 | 脉冲 4 |
|---|------|----------------|----------------|----------------|
| I_e/kA | 1.51 | 1.84 | 2.17 | 2.69 |
| U_d/kV | 442 | 489 | 439 | 369 |
| $P/\mu\text{perv}$ | 5.14 | 5.38 | 7.46 | 12.00 |
| d_{eff}/cm | 7.0 | 6.84 | 5.81 | 4.58 |
| $v_e/(\text{cm}/\mu\text{s})$ ($v_{\text{平均}}$) | 1.73 | (v_1) 0.33 | (v_2) 2.15 | (v_3) 2.79 |

(c) ($16^\#$) 二极管阴阳极初始间隙为 85mm

| | 脉冲 1 | 脉冲 2 | 脉冲 3 | 脉冲 4 |
|---|------|----------------|----------------|----------------|
| I_e/kA | 0.98 | 1.18 | 1.53 | 1.65 |
| U_d/kV | 435 | 477 | 420 | 416 |
| $P/\mu\text{perv}$ | 3.42 | 3.58 | 5.62 | 6.15 |
| d_{eff}/cm | 8.50 | 8.31 | 6.63 | 6.34 |
| $v_e/(\text{cm}/\mu\text{s})$ ($v_{\text{平均}}$) | 1.54 | (v_1) 0.40 | (v_2) 3.50 | (v_3) 0.66 |

注: 表 1(a) 数据中, 实际二极管在第 4 个脉冲时已出现二极管短路现象(见图 3(b)); v_1 是指脉冲 1 和脉冲 2 间阴极等离子体膨胀平均速率; v_2 是指脉冲 2 和脉冲 3 间阴极等离子体膨胀平均速率; v_3 是指脉冲 3 和脉冲 4 间阴极等离子体膨胀平均速率.

在数据处理过程中还发现, 当阴阳极距离增大, 在不同二极管电压条件下, 由 $I_e/V_d^{3/2}$ 得到的第一个脉冲导流系数一致性越好, 这说明模型近似程度越高. 同时, 第 2, 3 个脉冲间等离子体膨胀速率比第 1, 2 个脉冲过程间等离子体膨胀速率大很多, 并且第 1, 2 个发射电流脉冲受阴极等离子体影响较小, 因此一致性也好. 当二极管初始间隙增大, 导流系数降低时, 阴极等离子体膨胀速率变小. 这一现象和阴极等离子体密度也有一定关系, 但由于实验条件有限, 不能进行进一步实验验证. 由于本实验中二极管电压较低, 发射电流较大, 因此计算得到的导流系数都较大, 在几个 μperv 至 $20\mu\text{perv}$ 之间. 当导流系数大于 $15\mu\text{perv}$ 时, 实际二极管已经不能可靠断开, 发射电流波形中出现振荡(图 4). 图 4(a) 中, 二极管已经断开, 第 4 个脉冲二极管导流系数为 $12.00\mu\text{perv}$. 图 4(b) 中由于阴极等离子体膨胀, 导致二极管未能可靠断开, 第 4 个脉冲二极管导流系数为 $42.54\mu\text{perv}$.

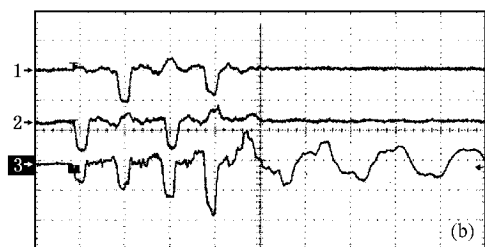
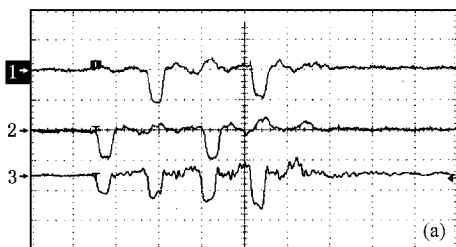


图 4 主脉冲过后二极管情况(500ns/div, 496kV/div(通道 1, 2), 1.2kA/div(通道 3))

4. 阴极等离子体运动对强流束品质影响

电子电流负载效应. 在直线感应加速器注入器中, 二极管电压是阴阳极各个感应腔电压的叠加. 而

感应腔上的电压不仅和激励脉冲电压幅度有关, 还和脉冲期间流过腔间隙的负载电流有关. 在本实验条件下, 不同脉冲的二极管电压和二极管电流关系为

$$V_{di} = \frac{2Z_c}{2Z_B + Z_c} [2U_{Bi} - 2Z_B I_{ei}], \quad (3)$$

式中 i 为脉冲序数, $2Z_B$ 是感应腔激励源内阻, Z_c 是感应腔等效阻抗, U_{Bi} 是激励源输出脉冲电压幅度.

设不同脉冲过程中激励源输出脉冲电压幅度是一致的, 即 $U_{Bi} = U_B$, 由于阴极等离子体的存在并膨胀, 导致二极管有效间隙变小, 减小了二极管阻抗, 使发射电流增加. 因此, 得到的发射电流随脉冲序数在增加, 二极管电压幅度在降低. 另外, 由于本 4 脉冲实验装置是在单脉冲注入器基础上改造的, 每个脉冲过程中, 总有 6 个空闲腔. 6 个空闲腔由于电流负载效应感应产生正脉冲电压, 并对实际二极管脉冲电压幅度有贡献. 在激励源和感应腔匹配条件下 (实验装置中是实现匹配的), 实际二极管电压表达式为

$$V_{di} = 2U_{Bi} - 2Z_B I_{ei} - 6Z_B I_{ei} = 2U_{Bi} - 8Z_B I_{ei}. \quad (4)$$

由于阴极等离子体膨胀和电子电流负载效应的存在, 二极管引出的不同电子束脉冲间不仅束流大小不同, 电子能量也存在差异. 相邻两个脉冲间电子束能量差异式为

$$\Delta V_{i+1} = 8Z_B (I_{e,j+1} - I_{ei}). \quad (5)$$

由于不同脉冲电子束能量有差异, 将影响束引出和束聚焦. 从 (5) 式可以看出, 要减小多脉冲束间能量差异, 有两个途径: 一是降低腔阻抗和激励源阻抗; 二是采取措施减小阴极等离子体膨胀速度和降低由于阴极等离子体膨胀导致二极管间隙相对减小量. 这可以采取以下措施. 一是在要求引出束流一定条件下, 适当增大阴极发射面. 由于阴极等离子体膨胀属于一种惯性膨胀, 阴极面发射电流密度大, 阴极

表面附近的等离子体密度也大, 膨胀速度将增大. 采用大发射面低发射电流密度可以降低阴极等离子体膨胀速度. 二是提高二极管电压幅度. 这有助于增加二极管间隙, 降低二极管导流系数, 可以有效降低阴极等离子体带来的相对影响, 减小相邻发射电流脉冲幅度间差异.

对发射度的影响. 发射度是表征强流高亮度电子束流主要参数之一. 为了获得高亮度电子束, 必须降低电子束源发射度. 因此强流电子束加速器注入器通常采用布里渊设计^[11], 即阴极面磁场强度为零. 在这种情况下, 通过磁场设计, 层状束流理想平衡是可能实现的. 但由于阴极等离子体的膨胀和实际阴极发射面的推移, 在多脉冲情况下, 即使第 1 个脉冲发射时阴极面处于零磁场状态, 后续脉冲发射时不能保证处于零磁场发射, 这将增加后续脉冲电子束发射度, 降低束亮度. 可能的解决方案是降低阴极面附近磁场梯度, 从而降低磁场影响.

5. 结 论

实验研究表明, 阴极等离子体的存在对强流多脉冲电子束源的影响不可忽略. 它不仅影响场致发射电子束流大小, 还影响束流品质. 高导流系数二极管不利于降低阴极等离子体膨胀速率和对多脉冲二极管电子束场致发射的影响.

本工作得到了薛之春研究员、戴光森研究员、程念安研究员的指导和帮助, 实验中得到陈思富博士、潘海峰的帮助, 在此表示感谢.

- [1] Dai G S *et al* 2002, *Proc 3rd International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications* (Sichuan: Editorial Office of HPLPB) p201
- [2] Baugaev S P, Cherepenin V A and Kanavets V I 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** p518
- [3] Paschen F 1916 *Ann. Physics* **50** 901
- [4] Yao R H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** P922 [in Chinese] 姚若河等 2000 *物理学报* **49** 922]
- [5] Bernhard K 1983 *IEEE Trans. Nuclear Sci.* **NS-30** 3026
- [6] Mesyats G A 1989 *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum* (New

York: Springer-Verlag) p50

- [7] Prono D S 1985 *IEEE Trans. Nuclear Sci.* **NS-32** 3144
- [8] Xia L S and Zhang L W 2002 *Proc 3rd International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications* (Sichuan: Editorial Office of HPLPB) p 206
- [9] Shiffler D A and Lacour M J 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **20** 517
- [10] Humphries S Jr 1990 *Charged Particle Beams* (New York: John Wiley & Sons) p175
- [11] Brillouin L 1945 *Phys. Rev.* **67** 260

Explosion of cathode plasma in intense multi-beams electron vacuum diode^{*}

Xia Lian-Sheng Wang Meng Huang Zi-Ping Zhang Kai-Zhi Shi Jin-Shui Zhang Lin-Wen Deng Jian-Jun

(*Institute of Fluid Physics , China Academy of Engineering Physics ,Mianyang 621900 ,China*)

(Received 29 May 2003 ; revised manuscript received 8 January 2004)

Abstract

This paper is involved in generation , explosion of cathode plasma of electron vacuum diode under four-pulse mode . Diode breakdown caused by cathode explosion is observed in experiment . On the assumption that the diode beams are space-charge-limited beams and according to the experimental data , the explosion velocity of cathode plasma is $0.5\text{--}4\text{cm}/\mu\text{s}$ and is different from each other in different pulse process . The effects of explosion of cathode plasma on diode voltage , diode impedance and multi-pulse beams are analyzed too .

Keywords : multi-pulse vacuum diode , cathode plasma , explosion velocity

PACC : 5260 , 5275P , 5280Q

^{*} Project supported by the Advanced Research for National Defence of China .