

阴极强流多脉冲发射特性研究

夏连胜 张篁 江孝国 杨安民 李成刚 王远 潘海峰

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)

摘要 实验研究了几种阴极的强流猝发多脉冲发射特性. 研究表明, 天鹅绒阴极产生的猝发强流双脉冲电子束亮度优于 $1 \times 10^8 \text{A}/(\text{m}\cdot\text{rad})^2$, 而直立碳纤阴极产生的强流三脉冲电子束的亮度也优于 $3 \times 10^7 \text{A}/(\text{m}\cdot\text{rad})^2$, 并有进一步提高的可能. 新型的冷场致发射阴极如纳米金刚石膜阴极和纳米碳管阴极也具有强流发射能力, 实验得到的发射电流密度大于 $50 \text{A}/\text{cm}^2$. 文中还给出的大发射面储备式热阴极的实验结果, 并对相关阴极实现稳定强流多脉冲发射的研究方向和应用前景进行了分析.

关键词 强流多脉冲电子束 阴极发射体 束亮度

1 引言

相对论性强流多脉冲电子束在高功率微波、高功率激光和电子束辐照效应研究等领域有着广泛的应用前景^[1]. 电子束的亮度对强流电子束在上述方面的应用具有重要的意义, 它影响着相对论强流电子光学系统的设计, 影响着电子能量转换成微波能量、光能量的效率和峰值功率. 在目前的技术条件下, 可以产生强流猝发多脉冲电子束阴极种类较多, 主要包括储备式热阴极、天鹅绒阴极、直立碳纤阴极. 同时随着纳米技术的兴起和发展, 纳米场发射阴极显现出在场致发射方面较强的优势. 在本研究中, 利用1台2MeV直线感应型强流电子注入器^[2]建立的多脉冲功率源系统^[3, 4], 开展了上述几种阴极在多脉冲条件下产生相对论性的强流发射特性研究, 并讨论了几种阴极在产生强流高亮度多脉冲电子束方面的应用前景.

2 多脉冲功率系统和诊断系统

多脉冲功率源的工作原理及装置结构参见文献^[2—4]. 该功率系统产生的二极管脉冲电压幅度在300—1000kV之间可调, 脉冲串数目2—4个可调. 电压脉冲宽度(FWHM)为90ns, 脉冲串内脉冲之间的时间间隔在250—1000ns之间可调. 二极管为平面真空

二极管, 工作时二极管真空度约 $2 \times 10^{-3} \text{Pa}$.

在研究中, 记录的关于阴极和多脉冲电子束的信息包括: 二极管电压、阴极发射电流、阴极发射电子束过程中阴极发射面的发光信号、电子束经过一段传输后的光斑信息、多脉冲电子束的流强和电子束的发射度信息等. 其中, 二极管电压用电容探头测量; 阴极发射电流采用电流探头进行测量; 利用电子束在石英介质中产生的契仑科夫辐射来确定电子束本身的信息^[5], 包括电子束斑和电子束发射度. 电子束流强度通过电阻环测量^[6].

胡椒筒结合荧光屏是测量脉冲电子束发射度的主要手段之一^[7]. 在本研究中, 采用了改进胡椒筒结合荧光屏电子束发射度测量的方案. 将多孔板改为十字正交的多孔板, 荧光屏由石英玻璃片代替, 利用电子束在石英片中产生的契仑柯夫效应获得经过小孔和自由空间漂移后电子束的束斑信息, 进而获得电子束的散角和束包络半径的信息, 得到电子束的发射度. 多孔板为有效直径80mm, 十字的两个方向上各有9个小孔, 孔直径1mm. 当去掉多孔板, 电子束直接作用在石英片上, 就可以得到电子束斑信息. 光信号的记录手段有普通工业CCD相机和8幅分幅相机. 实验中, 分幅相机的曝光时间为10ns, 两幅图像间间隔工作在20ns和40ns两档. 电子束发射度信息处理参见文献^[5, 7].

3 几种阴极的强流多脉冲发射特性

3.1 天鹅绒阴极的多脉冲发射特性

当多脉冲电压作用下真空二极管上, 天鹅绒阴极在强电场作用下, 形成场致等离子体发射^[8, 9]. 阴极发射的电流在外加引导和约束磁场作用下, 通过阳极的真空管道到达多孔板处. 在多孔板上游 200mm 处有电阻环给出到达注入器尾部的束流大小. 当多脉冲功率源运行在双脉冲情况下, 得到二极管电压、发射电流和电子束源出口处束流波形(如图 1 所示). 第 1 个二极管脉冲电压幅度为 589kV, 第 2 个二极管脉冲电压幅度为 570kV. 发射电流分别为 1.8kA 和 2.0kA. 束源出口处束流分别为 374A 和 390A.

由于光信号太弱和分幅相机的灵敏度问题, 电子束经过多孔板后电子束元的光信息由工业 CCD 记录. 因此得到的是双脉冲电子束的积分发射度. CCD 记录到的发射度信息及处理结果如图 2 所示. 得到电子束元产生的光斑平均半高宽为 1.65mm, 束包络均方根半径为 32.5mm. 则对应束平均发散角为 1.63mrad, 电子束的均方根发射度为 53mm·mrad. 电子束的相对论

因子 γ 为 2.17, $\beta=0.888$, 电子束归一化均方根发射度约为 102mm·mrad, 归一化边发射度为 408mm·mrad. 取脉冲束流为 370A, 得到双脉冲电子束源产生的电子束积分归一化亮度约为 $4.14 \times 10^8 \text{A}/(\text{m}\cdot\text{rad})^2$.

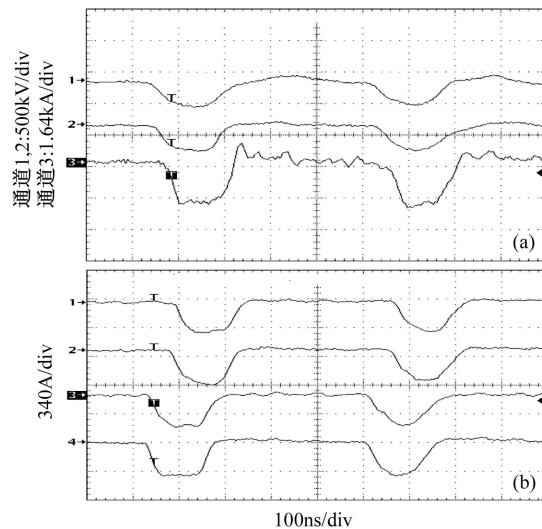


图 1 (a) 双脉冲二极管电压、阴极发射电流; (b) 电阻环测到的束流
4 个通道分别为探测器 x, x', y, y' 方向的信号^[6].

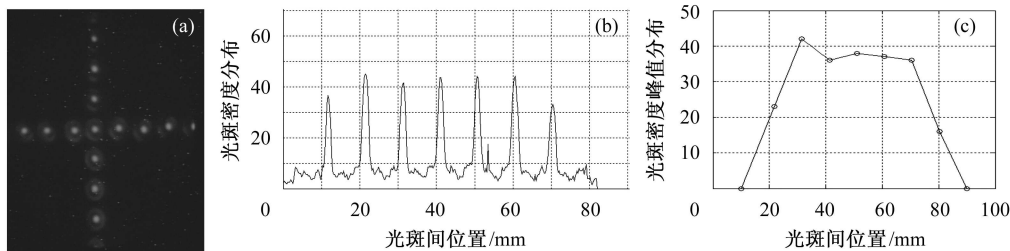


图 2 (a) 所获得的双脉冲束积分光斑; (b) 密度扫描; (c) 包络半径处理结果

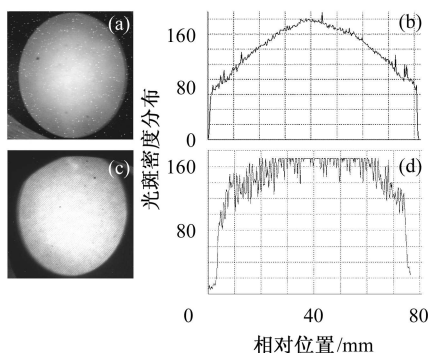


图 3 双脉冲电子束的积分和时间分辨光斑情况对比
(b), (d)的纵、横坐标与图 2(b) 相同.

为了能够使用分幅相机获得两个脉冲电子束斑的时间分辨结果, 通过减小二极管间隙, 增加阳极孔

径的办法, 当发射电流达到 2.8kA 和 3.0kA 时, 在注入器尾部得到近 1000A 的双脉冲电子束流. 同时将两个脉冲间隔调整为 280ns (在 40ns 档正好拍 8 幅图像). 图 3(a), (b) 分别为用工业 CCD 得到的双脉冲电子束积分光斑及光斑灰度扫描结果. 图 3(c), (d) 分别为用分幅相机得到的第 1 个脉冲电子束时间分辨光斑及光斑灰度扫描结果(略有些饱和). 两幅图像得到的电子束斑半高全宽基本一致, 约 70mm.

图 4 是两个实验中由分幅相机记录的第 1 个(图 4(a), 相邻图像间间隔 20ns) 和第 2 个(图 4(b), 间隔 40ns) 脉冲电子束光斑的变化过程. 从图中可以看出, 天鹅绒阴极在双脉冲发射条件下产生的第 1 个脉冲电子束包络较大; 第 2 个脉冲电子束包络较小. 导致两个电子束包络半径差异的原因可以从天鹅绒阴极的发射

机理角度进行解释. 天鹅绒阴极的强流电子发射是在强电场作用下的场致等离子体发射. 尽管第1个脉冲过程中, 在快高电压脉冲作用下, 天鹅绒阴极表面形成了比较均匀的等离子体, 但当第2个电压脉冲到来时, 阴极表面附近的等离子体还没有完全复合, 并且可能在局部有较大的浓度分布, 该部分的等离子体在外电场作用下迅速得到增强, 形成局部高密度等离子体, 产生局部等离子体发射^[9]. Saveliev Y. M.^[10]的在长脉冲作用下天鹅绒阴极的发射图像也给出了类似的结果.

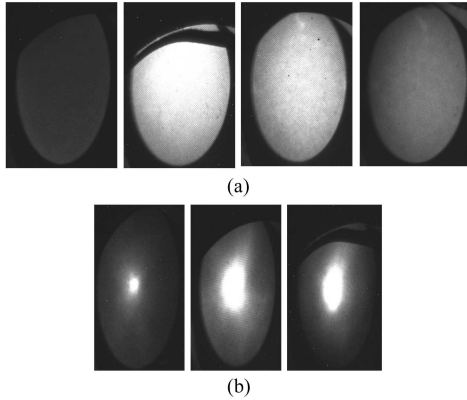


图4 两个脉冲电子束光斑的时间分辨变化过程

这种局部等离子体并不是稳定的. 不同的实验可能在不同部位发生, 也可能在某些实验中第2个脉冲发射中阴极表面是均匀发射. 这和二极管区等离子体浓度、阴极等离子体膨胀速度、阴极等离子体膨胀相对影响程度有关, 还和相邻两个脉冲时间间隔有关. 当二极管间隙足够大、阴极发射电流密度较小、相邻两个脉冲时间间隔足够大时, 第2个脉冲发射受第1个脉冲发射影响足够小的情况下, 第2个电子束脉冲的包络和第一个电子束脉冲包络具有较好的一致性.

3.2 直立碳纤阴极的多脉冲发射特性

Shiffler D. A. 给出了碳纤阴极的研究结果^[11], 还给出了阴极表面浸CsI可以降低阴极等离子体膨胀速度和降低发射阈值的情况. 在实际应用中, 由于所获得的碳纤布的纤维是垂直于电场方向的, 这和天鹅绒阴极形成比较大的差别, 从理论上讲不利于场致发射. 这也是碳纤阴极没有得到广泛应用的原因之一. 随着工艺的进步, 目前可以获得使碳纤纤维的方向和外加电场方向一致的阴极: 直立碳纤阵列(图5). 这种阴极将碳纤丝做成束, 然后植于石墨衬底上.

实验是在多脉冲功率源工作在三脉冲状态下进行的. 图6是实验获得的发射电流、二极管电压波形(a)和电子束源出口处束流波形(b). 二极管区阴极

面的发射情况由一台CCD相机记录(图7), 电子束发射度的信息和天鹅绒阴极实验时一样, 由一台CCD记录(图8(a)). 经过处理, 得到电子束分布(图8(b)).



图5 直立碳纤阴极样品

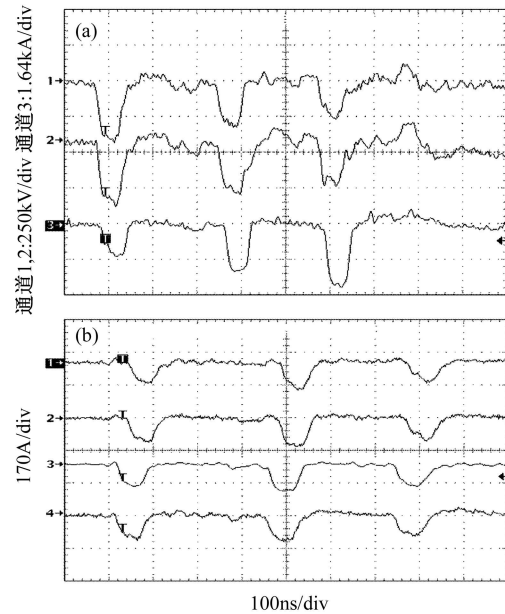


图6 (a) 二极管电压、发射电流波形; (b) 束流波形

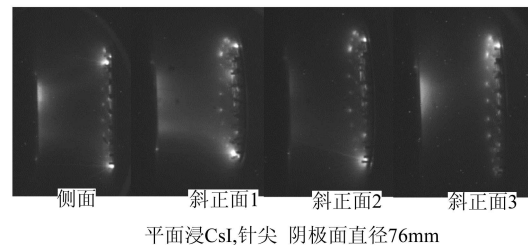


图7 阴极面发光图像

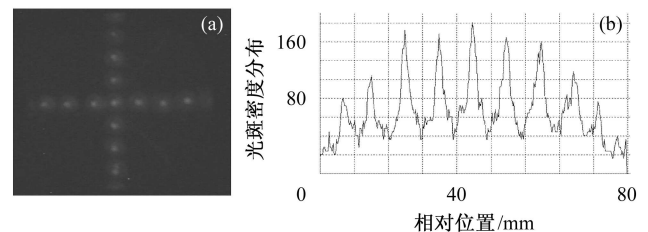


图8 三脉冲电子束的积分发射度信息和灰度扫描结果

通过拟合, 得到平均发散角为6.1mrad, 均方根半径为25mm, 均方根发射度为213mm·mrad. 二极

管电压约400kV, 因此得到归一化均方根发射度为314mm·mrad, 归一化边发射度为1256mm·mrad. 注入器尾部束流约150A, 因而得到电子束亮度约为 $3 \times 10^7 \text{ A}/(\text{m}\cdot\text{rad})^2$.

3.3 纳米金刚石膜的强流多脉冲发射特性

金刚石因其独特的力学、声学、光学、电学以及热力学性能而成为最具有应用前景的功能材料. 由于用气相沉积方法可以制备大面积、纯晶化金刚石, 并且成本较低, 成为制备人造金刚石主流工艺.

金刚石膜具有优良的冷场致发射特性, 其在(111)晶面上具有较强的负电子亲和力, 非常有利于自由电子的引出. 有研究表明^[12], 纳米金刚石膜在30kV/cm的电场作用下发生冷场致发射, 不同于天鹅绒阴极的场致等离子发射, 初始电子温度低, 横向电子能量小, 因而具有较高的初始亮度. 美国的MCC公司制备的金刚石膜在100kV/cm的电场强度下获得 $10 \text{ A}/\text{cm}^2$ 的发射电流密度, 并且是连续工作. DARHT-I研究过程中, 曾经尝试用光致发射金刚石膜阴极代替天鹅绒阴极获得低温自由电子束. 在其所进行的实验中, 利用其低逸出功特性进行了激光照射获得自由电子研究, 获得的发射电流密度达到 $60 \text{ A}/\text{cm}^2$.

在双脉冲功率源上对纳米金刚石膜样品进行了强脉冲电场作用下的强流电子发射特性研究. 实验中所用金刚石膜样品是在P型半导体硅上用化学气相沉积的方法获得的(参见图9), 样品的直径为75mm, 实验获得了1.5kA的发射电流. 但3, 4次发射实验后, 第1个脉冲发射电流渐渐变小, 直至完全没有发射. 分析认为, 采用上述工艺研制的纳米金刚石膜具有一定的不稳定性, 随着实验的进行发射电流密度逐渐下降. 10多次发射实验后, 第2个脉冲也没有测量到电流了.

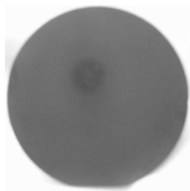


图9 用于实验的纳米金刚石膜阴极

3.4 纳米碳管阴极

自1991年Iijima^[13]发表纳米碳管的文章以来, 纳米碳管在机械、电、热传导、超导等方面都被证实具有独特的性能, 尤其是在场发射特性方面最被看好, 其场致发射电流密度是传统场致发射材料发射的电流密度千倍以上. 如过去采用钨或钼的尖端等可在30—40V/ μm 的电场下发射 nA/cm^2 级的电流密度,

而用金刚石则可达 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 如今用纳米碳管可以轻易在3—4V/ μm 的电场下达到 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 级的电流密度, 甚至高达 mA/cm^2 的电流密度, 比金刚石的发射电流密度高5到6个量级, 是一种理想的冷场致发射阴极.

实验中所用的纳米碳管阴极直径约3cm, 生长在一片铝基上. 在实验中, 将上述的阴极粘帖在前文中所述的铜座上(图10(a)). 实验是在脉冲功率源工作在双脉冲状态时进行的(图10(b)). 二极管电压 $\sim 800 \text{ kV}$; 二极管平均电场强度 $100 \text{ kV}/\text{cm}$; 二极管真空优于 $3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$.

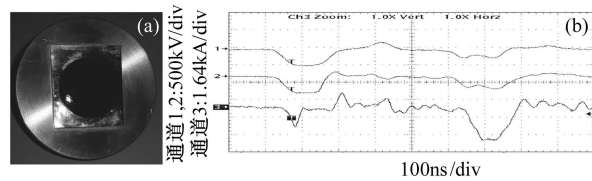


图10 (a) 纳米碳管阴极; (b) 实验获得的发射电流波形
通道1, 2脉冲电压波形, 通道3发射电流波形.

初步结果: 最大脉冲发射电流大于2kA; 第一次实验两个脉冲过程中均有发射. 由于磁场系统出了故障, 未能将电子束引导至发射度测量系统处, 故没有得到电子束流信号和电子束发射度信号, 也未能记录下发射电流信号; 第二次及以后的实验第1个脉冲期间没有发射电流信号, 第2个脉冲期间有发射电流信号. 发射电流随着实验次数增加而降低. 此现象和进行金刚石膜时的现象极为类似: 刚开始阴极具有较强发射能力, 但一两次发射后发射性能就极大地下降了.

3.5 储备式热阴极

热阴极是一种历史比较悠久、得到广泛应用的阴极. 由于其产生的电子束初始横向动量小, 束亮度高, 在弱流加速器中得到广泛应用. 但由于其发射电流密度较低, 在强流加速器中未能得到有效的应用. 随着阴极制备技术的进步和束流传输方案的改进, 热阴极在强流电子加速器中应用成为了可能. 最为显著的是应用在美国DARHT-II长脉冲加速器上, 其采用储备式热阴极, 阴极发射面直径达到6.5英寸, 工作温度 1050°C , 工作时的发射电流密度在 $10 \text{ A}/\text{cm}^2$.

实验研究是在一台长脉冲功率源上进行的, 功率源输出脉冲电压幅度可以到达250kV, 脉冲平顶宽度达到 $3 \mu\text{s}$ ^[14]. 二极管真空可以达到 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 满足热阴极试验对于真空的要求. 阴极为M型表面镀钨储备式热阴极, 发射面直径为55mm(图11). 图12是实验

获得的二极管电压波形和阴极发射电流波形. 实验获得最大100A的发射电流.

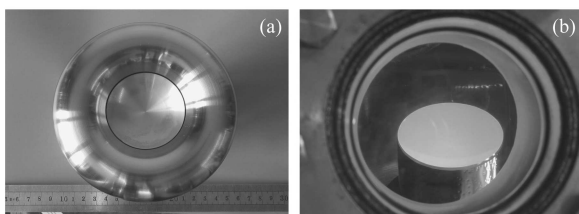


图 11 (a) 装在屏蔽电极中的热阴极; (b) 进行加热试验时的阴极

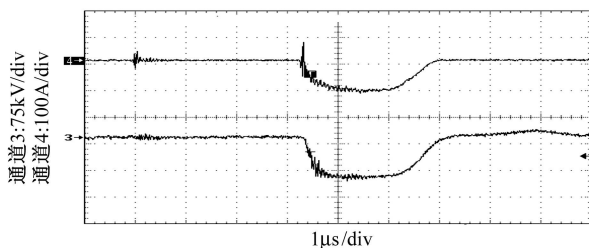


图 12 热阴极发射电流(通道4)和二极管电压波形(通道3)

4 讨论

天鹅绒阴极具有较强的多脉冲发射能力, 但阴极等离子体的存在和膨胀影响了后续电子束脉冲的品质. 要提高后续电子束脉冲品质, 可以从降低阴极等离子体密度和减小阴极等离子体相对影响程度着手. 同天鹅绒阴极相比, 直立碳纤阴极存在以下优点: 发射阈值较低, 阴极面发光点相对均匀. 不利方面: 发射增长较快, 反映出阴极等离子体膨胀速度较预期的大; 发射度相对较大. 但这有待进一步实验验证.

作为一种冷场致发射阴极, 要获得稳定且较强的发射电流密度, 分析认为所研制的纳米金刚石膜应具备以下特点: 基片采用P型半导体硅, 并且是(111)面切割. 因为最终需要获得的是(111)晶面的金刚石膜,

基片采用(111)晶面, 有利于金刚石的生长和附着; 基片上采用刻蚀技术获得具有一定尖端的阵列, 阵列线宽在100 μm 量级, 尖端高度在50 μm 左右; 采用化学气相沉积工艺获得金刚石膜, 膜的厚度在 μm 量级; 在制备金刚石膜过程中加入掺杂工艺, 获得P型金刚石膜.

纳米碳管有非常好的场致发射特性, 但是电流电场强度的关系极为陡峭, 同时纳米碳管场发射的稳定度也有一定问题. 并且发射电流密度较低, 对于产生强流电子束是不利的. 但由于其是冷场致发射, 可以获得亮度极高的电子束, 具有较好的研究前景.

热阴极的发射电流密度较低, 要利用热阴极获得数kA的多脉冲电子束, 必须增大阴极发射面. 由于阴极面加热具有一定不稳定性, 必须使二极管工作在空间电荷限制流条件下, 这意味着实际使用热阴极的发射电流密度要小于阴极本身的发射能力. 大发射面热阴极的研制是热阴极用于强流多脉冲电子束源的必然途径.

5 小结

通过实验, 研究了几种可能用于产生强流多脉冲电子束的阴极的发射特性. 天鹅绒阴极、直立碳纤阴极是当前可以直接得到且能够稳定产生多脉冲电子束的阴极. 纳米金刚石膜阴极和纳米碳管阴极由于其独特的特点表现出其极具研究意义和应用前景. 对于传统的热阴极, 能够产生稳定多脉冲电子束. 但如果采用热阴极获得数kA以上的强流脉冲电子束, 研制大发射面直径阴极是一条必然途径.

本文研究中所用的部分阴极样品由刘列教授、姚林教授、沙健教授和李季教授提供. 在研究中刘承俊研究员、戴光森研究员、程念安研究员给予了指导和帮助. 实验中还得到刘云龙和杨国君博士的帮助.

参考文献(References)

- 1 YANG Hai-Liang, QIU Ai-Ci et al. Acta Phys. Sin, 2004, **53**: 406 (in Chinese)
(杨海亮, 邱爱慈等. 物理学报, 2004, **53**: 406)
- 2 DAI G S, XIE M, LIU X P et al. The Pulsed Power System for 2MV Electron Beam Source. In: Editorial Office of HPLPB. Proc. 3rd Intern. Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications. Sichuan: Editorial Office of HPLPB, 2002. 201
- 3 XIA L S, WANG M, HUANG Z P et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**: 251 (in Chinese)
(夏连胜, 王勐, 黄子平等. 强激光与粒子束, 2004, **16**: 251)
- 4 XIA L S, ZHANG L W, HUANG Z P et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**: 943 (in Chinese)
(夏连胜, 章林文, 黄子平等. 强激光与粒子束, 2004, **16**: 943)
- 5 CHEN S F, DING B N, XIA L S et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, **14**: 317 (in Chinese)
(陈思富, 丁伯南, 夏连胜等. 强激光与粒子束, 2002, **14**: 317)
- 6 XIE Y T, DAI Z Y, HAN Q. High Power Laser and Particle Beams, 2002, **14**: 151 (in Chinese)
(谢宇彤, 代志勇, 韩青. 强激光与粒子束, 2002, **14**: 151)
- 7 CHENG N A. Emittance Measurement of Pulsed Intense Relativistic Electron Beam. In: Editorial Office of HPLPB. Proc. of 10MeV LIA. Sichuan: Editorial Office of HPLPB,

1994. 197 (in Chinese)
(程念安. 见: 10MeV直线感应加速器会议文集. 四川: 强激光与粒子束编辑部, 1994. 197)
- 8 Parker R K, Anderson R E, Duncan C V. J. Applied Phys., 1974, **45**: 2463
- 9 XIA L S, WANG M, HUANG Z P et al. Acta Phys. Sin, 2004, **53**: 3435 (in Chinese)
(夏连胜, 王勳, 黄子平等. 物理学报, 2004, **53**: 3435)
- 10 Saveliev Y M. In: Pulsed Power Conference. Texas: IEEE, 2003. 833
- 11 Shiffler D A, Lacour M J, Sena M D. IEEE Transactions on Plasma Sci, 2000, **28**: 517
- 12 LI Y J, YAO N et al. J Phys. D: Appl. Phys., 1997, **30**: 2271
- 13 Iijima S. Nature, 1991, **354**: 56
- 14 GAO F, XIA L S, ZHANG L W et al. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**: 313 (in Chinese)
(高峰, 夏连胜, 章林文等. 强激光与粒子束, 2005, **17**: 313)

Research on Multi-pulsed Intensive Electron Beam Source

XIA Lian-Sheng ZHANG Huang JIANG Xiao-Guo YANG An-Min LI Cheng-Gang WANG Yuan
PAN Hai-Feng ZHANG Kai-Zhi SHI Jin-Shui ZHANG Lin-Wen DENG Jian-Jun

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

Abstract This paper is involved in multi-pulsed emission characteristics of some cathodes while generating intensive relativistic electron beams. Research results indicate that the velvet, the carbon fiber and the dispenser cathode all have the ability to generate a few kilo-ampere multi-pulsed beams with brightness better than $3 \times 10^7 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{rad})^2$. And some new cathodes such as carbon nano-tubes and nano-diamond film also can generate a few kilo-ampere multi-pulsed electron beams. Because of the cold field emission, the beams generated by the carbon nano-tubes and the nano-diamond film are expected to be higher brightness. Some experimental results of above cathodes are present and some suggestion for farther work is also proposed.

Key words multi-pulsed electron beams, cathode, brightness