

切伦科夫辐射的强流电子束均匀性光学诊断*

蔡丹¹, 刘列¹, 巨金川¹, 王潇²

(1. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 中国人民解放军 78010 部队, 四川成都 610000)

摘要:透明介质中带电粒子的运动速度大于介质中的光速时就会产生切伦科夫辐射光。搭建了基于切伦科夫辐射光的强流电子束均匀性诊断系统, 实现了时间和空间分辨的纳秒级电子束均匀性光学诊断。利用程序对诊断系统进行设计。在此基础上对两种天鹅绒阴极发射均匀性进行光学诊断测量。结果表明: 在相同电参数下, 碳纤维天鹅绒较化纤天鹅绒具有更好的发射性能, 与之对应的切伦科夫辐射光斑面积更大, 其亮度扫描曲线不但中心增强区域较化纤天鹅绒宽, 在其边缘附近也有较强的亮度分布; 通过分析切伦科夫辐射光斑的分布和强弱的时间分辨图像, 可以得到阴极在电脉冲过程中的运行状态, 具有 10ns ~ 100ns 级时间分辨特性。

关键词:强流电子束; 时间分辨均匀性诊断; 高速分幅相机

中图分类号: TL65; TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)02-014-05

Optical diagnosis system based on Cerenkov radiation for the uniformity of intense electron beam diode

CAI Dan¹, LIU Lie¹, JU Jinchuan¹, WANG Xiao²

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The PLA Unit 78010, Chengdu 610000, China)

Abstract: Electrons traversing a transparent medium emit Cerenkov light when the electron velocity exceeds the velocity of light in the medium. A time-and-space resolved optical diagnosis system based on Cerenkov radiation for the uniformity of intense electron beam diode has been founded. Before the operation of a series experiments, Particle-in-cell and Monte Carlo simulation codes were utilized to design the experiment structure. The emission uniformity of two kinds of velvet sample was studied. It was found that the carbon velvet cathode has much bigger central enhancement zone and the Cerenkov radiation light of the area near the edge is also brighter. The operating state of diode can be obtained by analyzing the time evolutions of Cerenkov radiation light which achieves 10ns ~ 100ns temporal resolution.

Key words: high-current electron beam; time-resolved uniformity diagnostics; high speed framing camera

强流(束流密度达几百到几千 A/cm^2) 脉冲 ($10^{-7} \sim 10^{-6} s$) 电子束在闪光 X 照相^[1]、高功率微波产生^[2]和电子束辐照^[3]等领域已经得到广泛应用。场致爆炸发射阴极在高压脉冲电场中能产生强流电子束, 是当前能够产生大于 $1kA/cm^2$ 电流密度的唯一一种阴极。这类阴极具有简单、易用、只需要少量的辅助设备等优势。但是, 也有严重的缺点和局限, 例如放气量大、电子非均匀发射、间隙闭合等^[2]。阴极发射均匀性是衡量束流品质的重要参量之一, 它不但会影响高功率微波器件的输出功率、束波转化效率, 还会影响微波输出的中心频率和所激励的模式^[4-9]。因此, 具有

时间和空间分辨阴极发射均匀性诊断研究对提高束流品质, 改善高功率微波 (High Power Microwave, HPM) 器件性能非常重要。众所周知, 当带电粒子在透明介质中运动速度大于介质中的光速时, 就会产生切伦科夫辐射光。切伦科夫辐射光强度与束流密度成正比, 诊断透明辐射靶表面的光强分布, 可以反映束流密度分布, 进而反映阴极发射的均匀程度^[10-11]。蔡丹等搭建了强流二极管阴极发射均匀性光学诊断平台, 利用高速分幅相机对两种天鹅绒阴极发射均匀性进行时间和空间分辨的光学诊断测量。

* 收稿日期: 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11305263, 61401484)

作者简介: 蔡丹 (1986—), 男, 陕西西乡县人, 博士研究生, E-mail: 263277440@163.com;

刘列 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: reseek206@163.com

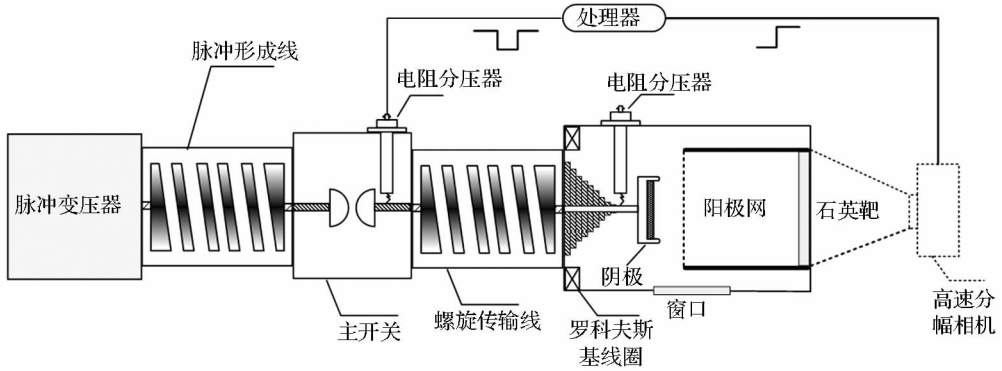


图1 实验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1 二极管电子束均匀性诊断系统

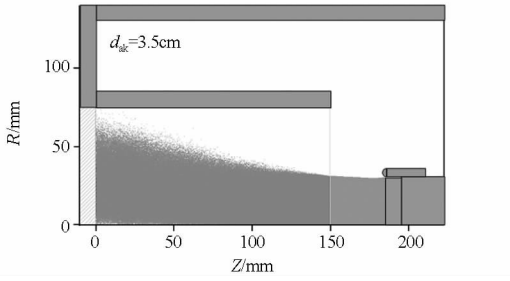
基于高压脉冲调制器和高速分幅相机的二极管等离子体光学诊断系统如图1所示。初级储能电容充电至预定电压值后,由控制台发出指令导通场畸变开关接通放电回路。电容通过脉冲变压器对水介质脉冲形成线进行充电,当形成线电压达到一定值时主开关自行导通,所形成的高电压经螺旋形传输线延迟后加载到二极管,由爆炸发射冷阴极产生强流电子束。高压脉冲调制器输出电脉冲半高宽的时间为110ns,前沿(电压幅值从10%上升到90%的时间)25ns,电压幅值200kV~500kV可调。高压脉冲调制器工作在单脉冲模式,运行间隔为3~5min。二极管采用平板型结构,阴极材料选择化纤天鹅绒和碳纤维天鹅绒。阴极直径6cm,为了抑制阴极边缘场增强,阴极头加装不锈钢屏蔽环,高度为2mm。阳极直径120mm,材料为不同目数的不锈钢和黄铜丝网,通过压环与阳极套筒螺纹连接。阴阳极间距1~5cm可调。二极管本底气压为 $9.999 \times 10^{-3} \sim 2.666 \times 10^{-2}$ Pa。二极管电压和电流通过电阻分压器和罗科夫斯基线圈测量。实验中使用高速分幅相机监测阴极电子轰击石英辐射靶产生的切伦科夫辐射光。高速分幅相机有4个微通道板像增强器模块,曝光时间3ns到数 μ s可调,同时通过相机自带软件CamWare设置幅间间隔时间用来控制拍照时序。高速相机工作模式有单曝光和多曝光两种,两种模式的循环周期均大于320ns。由于加载到强流电子束二极管阴极的高压脉冲宽度仅为百纳秒左右,实验中高速相机设定为单次单曝光模式。如图1所示,高速相机选用电触发工作模式,高压脉冲调制器主开关导通后的负极性高电压脉冲经电阻分压器衰减后由信号处理器转换为上升沿1.5ns的晶体管-晶体管逻辑电路(Transistor-Transistor Logic, TTL)

信号。为了实现高速相机与辐射靶切伦科夫辐射光的纳秒级同步,在主开关后加入用于延时的螺旋传输线(电长度110ns)。另外,为了防止阴极等离子体发光对拍照结果的影响,实验时在石英辐射靶内表面粘贴了遮光材料。

2 诊断系统设计

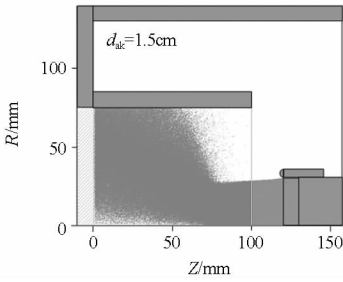
为了达到好的诊断结果,实验前需要对阳极套筒长度和石英转换靶厚度进行设计。采用商用粒子模拟(Particle In Cell, PIC)软件CHIPIC和开源蒙特卡洛软件CASINO^[12]对这两个参数进行设计。

图2为采用实际结构得到的二极管中典型的电子束相空间图。二极管电压设定为320kV,这是脉冲发生器稳定运行的典型值。图2(a)为阴阳极间隙 $d_{ak} = 3.5$ cm的情况,由阴极产生的强流相对论电子束通过阳极网后,由于没有导引磁场,在空间电荷斥力作用下产生径向膨胀。图2(b)将阴阳极间隙缩小到 $d_{ak} = 1.5$ cm,可以发现,电子束由阴极表面向阳极运动的过程中,束斑的半径不断减小,产生了明显的束流箍缩,电子在穿过阳极网后,自磁场产生的箍缩力仍然大于空间电荷斥力,但是随着束斑半径继续减小,空间电荷斥力迅速增大,当束斑半径达到最小值(束腰)时,空间电荷斥力大于自箍缩力,电子束流在阳极筒内无法正常传输,很多电子轰击在阳极支撑筒壁上。另外,由于束流的向内箍缩,会破坏原有的束流分布,使得诊断结果毫无意义。束斑减小,沉积到阳极网上的能量密度增大,不但会损害阳极网的寿命,同时也容易产生阳极等离子体,加快二极管闭合,影响二极管的正常运行。因此,在实验过程中为了保证束流的正常传输和有限的径向膨胀,选择阴阳极间隙为3.5cm,阳极支撑筒长为10cm(轰击到石英表面的电子束半径为5cm),内径为6cm。



(a) 阴阳极间隙 $d_{ak} = 3.5\text{cm}$

(a) $d_{ak} = 3.5\text{cm}$



(b) 阴阳极间隙 $d_{ak} = 1.5\text{cm}$

(b) $d_{ak} = 1.5\text{cm}$

图 2 典型的电子相空间图

Fig. 2 Typical phase-space picture of electrons

实验中,为避免强流电子束穿透石英转换靶且对真空腔进行密封,石英靶必须具有一定厚度,但也不能太厚,太厚会影响诊断结果的精度。图 3 为二极管电压 320kV 时入射到石英靶上的电子束动量的径向和轴向分量之比 P_r/P_z 与电子束入射位置 R 的关系。可以发现电子轰击到石英玻璃的最大半径约为 6cm。随着 R 的增加, P_r/P_z 绝对值增大, P_r/P_z 绝对值几乎都小于 0.5, 对应于电子束与石英靶表面夹角 θ 为 63.4° , 也就是说电子束以大于 63.4° 的入射角辐照到石英靶上。另外,通常二极管电压典型值为 300kV ~ 400kV。因此有必要对不同电压和入射角情况下电子束穿透深度进行计算,以便设计石英辐射靶厚度。

图 4 为 CASINO 模拟得到的电子透射深度与电子能量的关系,这里电子透射深度为电子在辐射靶内能够到达的最远距离。由图 4 可知电子透射深度与电子能量成正比,当电子能量为 360keV 时,电子透射深度为 0.83mm。图 5 给出了电子透射深度与电子入射角的关系,可以发现相同能量下,电子的透射深度与入射角度基本无关。实验中,为了保证二极管的稳定运行,二极管电压都不高于 400kV,石英辐射靶厚度采用 3mm。辐射靶厚度大于透射深度主要是由于石英辐射靶还要用作二极管真空腔的真空密封,为了避免石英靶在大气压下破损,厚度有所增加。由于厚度增加

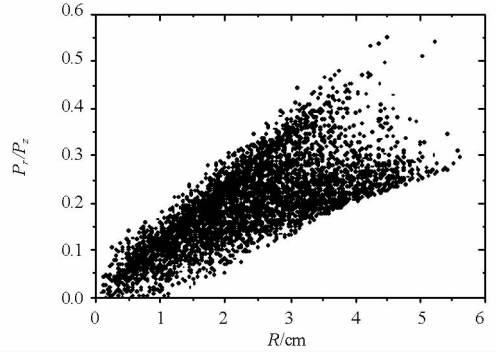


图 3 石英辐射靶上 P_r/P_z 与 R 的关系

Fig. 3 Relationship between P_r/P_z and R at the surface of quartz slice

空间分辨率有所下降,对于电子能量 320keV 垂直入射石英靶(厚度 3mm)其切伦科夫辐射角约为 30° ,此时空间分辨率为 3.5mm。

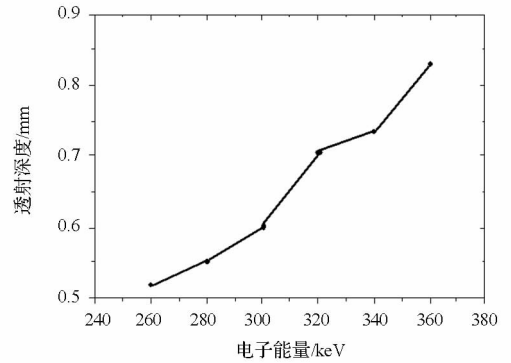


图 4 电子透射深度与电子能量的关系

Fig. 4 Relationship between variation of penetration depth and electron energy

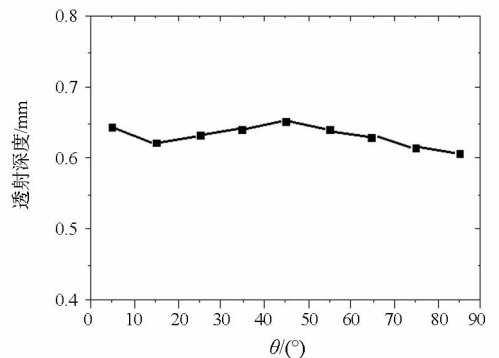


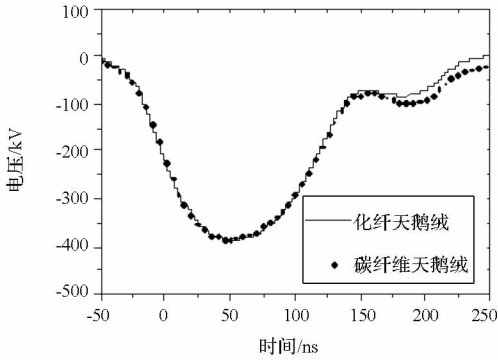
图 5 电子透射深度与入射角 θ 的关系

Fig. 5 Relationship between variation of penetration depth and incidence angle θ

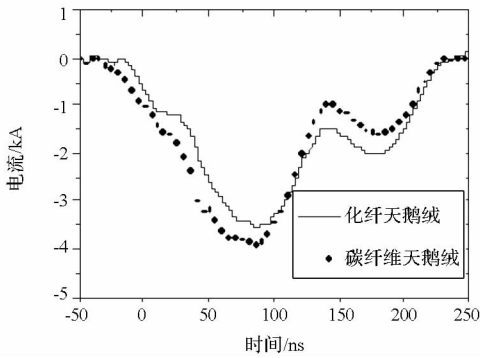
3 实验结果和讨论

图 6 为典型的电流电压波形,阴阳极间距为 3.5cm。电压平顶的宏观电场强度约为 110kV/cm,在电压波形近似相同的情况下,电流波形存在不同,碳纤维天鹅绒相比化纤天鹅绒的发射电流幅值要大,电流波形半高宽也更宽。这

个结果重复了数十炮次。



(a) 电压波形
(a) Voltage waveforms

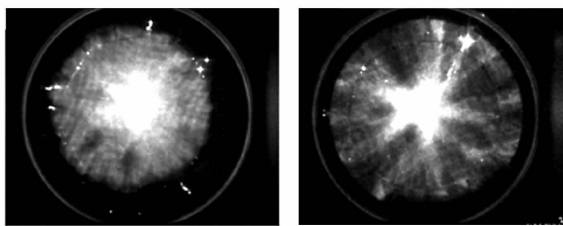


(b) 电流波形
(b) Current waveforms

图 6 典型的电压电流波形

Fig. 6 Typical voltage and current waveforms

图 7 对比了两种不同天鹅绒阴极辐射光斑分布特性,拍摄时刻为电压加载后 80ns,其电流电压波形如图 6 所示,图 7(a)为普通的化纤天鹅绒的辐射光斑;图 7(b)为碳纤维天鹅绒的辐射光斑。化纤天鹅绒辐射光斑直径为 56mm,呈现类高斯分布,中心与周围光强对比明显;碳纤维天鹅绒辐射光斑直径为 61mm,呈现辐射状,光强分布较为均匀。



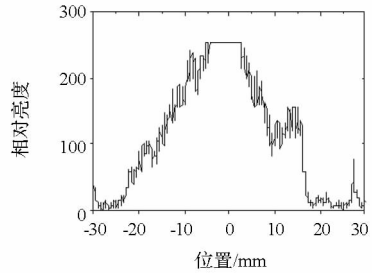
(a) 化纤天鹅绒 (b) 碳纤维天鹅绒
(a) Polymer velvet (b) Carbon fiber velvet

图 7 切伦科夫辐射光斑分布

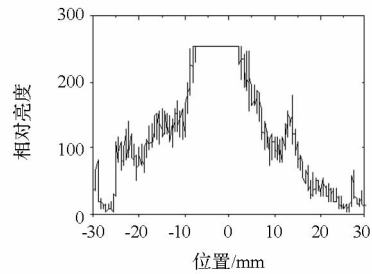
Fig. 7 Distributions of Cherenkov radiation spot

沿辐射靶径向对图像进行亮度扫描,可以得到辐射光强沿径向的分布,如图 8 所示。可以发

现图像的亮度是非均匀的,中心处为局部亮度增强区域,由于相机快门时间较长,中心出现曝光过度,导致光强的饱和。对比发现,碳纤维天鹅绒其边缘附近有较亮的亮度分布,这印证了碳纤维天鹅绒发射电流和有效发射面积较大的结论。



(a) 化纤天鹅绒
(a) Polymer velvet

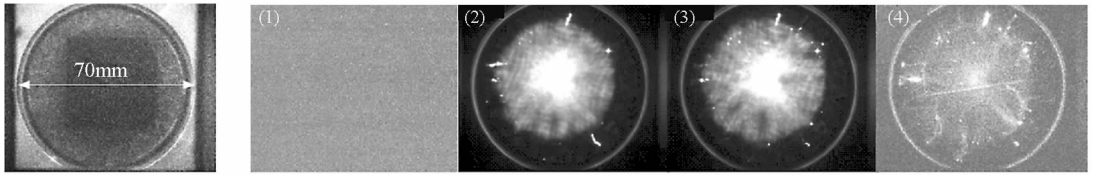


(b) 碳纤维天鹅绒
(b) Carbon fiber velvet

图 8 亮度扫描曲线

Fig. 8 Brightness scanning curves

图 9 为切伦科夫辐射光斑随时间的演化过程,图 9(a)为辐射靶石英玻璃的对焦照片,石英玻璃的直径为 70mm;图 9(b)为高速相机拍到的辐射光斑随时间的演化过程图像;对应的电压电流波形和拍摄时机如图 9(c)所示,快门时间均为 10ns。0 ~ 10ns 时,没有发现电子束轰击石英板产生的切伦科夫辐射光斑,分析电压电流波形(图 9(c))可以发现,尽管二极管电压幅值超过了切伦科夫辐射的阈值电压(190kV),但是此时的电流较小,因此光产额较小;60ns ~ 70ns 时,有强烈的切伦科夫辐射,辐射光斑呈现类高斯分布,中心区域光强很强,此时的电压电流幅值以及单个电子的光产额和电子束密度都较 0 ~ 10ns 时明显增大;120ns ~ 130ns 时,随着电压脉冲幅值的下降,发射电流幅值也相应减小,此时光强减弱;180ns ~ 190ns 时,电压幅值进一步减小至低于切伦科夫辐射阈值电压,切伦科夫辐射光斑基本消失。因此,通过辐射光斑的时间演化,可以对应得到阴极的发射状态。

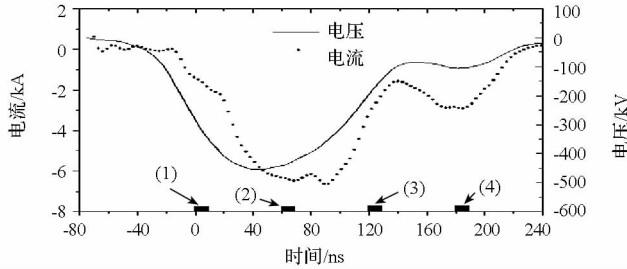


(a) 石英靶

(b) 高速分幅相机拍到的切伦科夫辐射演化过程图像

(a) Quartz target

(b) Evolution of Cherenkov light seen with HSFC



(c) 二极管电压电流波形

(c) Voltage and current of diode

图 9 石英转换靶上切伦科夫辐射光的演化过程

Fig.9 Typical evolution of electron Cherenkov light images from quartz target

4 结论

强流电子束阴极的非均匀发射是这类阴极面临的主要问题,影响高功率微波器件的输出功率、束波转化效率,还会影响微波输出的中心频率和所激励的模式^[1-7]。研究强流电子束均匀性对于筛选合适的阴极材料、优化设计电磁结构,进而提高高功率微波器件的输出性能都具有重要意义。由于强流电子束阴极脉冲式的工作状态,脉宽通常在 100ns 左右,纳秒量级分辨的诊断研究更为迫切。从阴极有效发射面积、阴极等离子体发光和电子束切伦科夫辐射光斑这三个方面对高功率微波源常用的阴极材料(化纤天鹅绒和碳纤维天鹅绒)的电子束发射均匀性进行了初步研究。实验在一台脉宽 120ns,电压 350kV ~ 450kV 的脉冲功率发生器上进行。结果表明:(1)在相同电参数下,碳纤维天鹅绒较化纤天鹅绒具有更好的发射性能,与之对应的切伦科夫辐射光斑面积更大,其亮度扫描曲线不但中心增强区域较化纤天鹅绒宽,在其边缘附近也有较强的亮度分布;(2)通过分析切伦科夫辐射光斑的分布和强弱的时间分辨图像,可以得到阴极在电脉冲过程中的运行状态,具有 10ns ~ 100ns 时间分辨特性。

参考文献 (References)

[1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
LIU Xisan. High pulsed power technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)

[2] Benford J, Swegle J. High power microwave[M]. Norwood : Artech House, 1992.
[3] Dong C, Wu A, Hao S, et al. Surface treatment by high current pulsed electron beam [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163 : 620 - 624.
[4] Liu L, Li L M, Zhang X P, et al. Efficiency enhancement of reflex triode virtual cathode oscillator using the carbon fiber cathode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35 (2) : 361 - 368.
[5] Shiffler D A, Ruebush M, Zagar D, et al. Emission uniformity and emittance of explosive field-emission cathodes [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(4) : 1592 - 1596.
[6] Zhang J, Zhong H H, Shu T, et al. A new high efficiency MWCG operating at low magnetic field [J]. Chinese Physics Letters, 2003, 20(12) : 2265.
[7] 张晓萍. 新型磁绝缘线振荡器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
ZHANG Xiaoping. A novel magnetically insulated transmission line oscillator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
[8] 王弘刚. 调制型虚阴极振荡器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
WANG Honggang. Investigation of a virtual cathode oscillators with e-beam modulation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
[9] 刘静. 同轴波导虚阴极振荡器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
LIU Jing. Investigation of a virtual cathode oscillator with coaxial waveguide [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
[10] Shiffler D A, Ruebush M, Haworth M D, et al. Carbon velvet field-emission cathode [J]. Review of scientific instruments, 2002, 73(12) : 4358 - 4362.
[11] Liao Q L, Zhang Y, Huang Y H, et al. Explosive field emission and plasma expansion of carbon nanotube cathodes [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(15) : 151504.
[12] Drouin D, Couture A R, Joly D, et al. CASINO V2.42 - A fast and easy-to-use modeling tool for scanning electron microanalysis users [J]. Scanning, 2007, 29(3) : 92 - 101.