

碳纳米管阴极的短脉冲爆炸场 发射与等离子体膨胀*

廖庆亮¹⁾ 张 跃^{1)†} 黄运华¹⁾ 齐俊杰¹⁾ 高战军¹⁾ 夏连胜³⁾ 张 篁³⁾

1) 北京科技大学材料物理与化学系, 北京 100083)

2) 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

3) 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2007 年 2 月 16 日收到, 2007 年 6 月 17 日收到修改稿)

采用碳纳米管制备了一种强流电子束发射阴极, 并对碳纳米管阴极在双脉冲条件下的强流发射性能进行了研究. 在双脉冲条件下获得了 245 A/cm^2 的强发射电流密度, 阴极的开启时间约为 40 ns . 采用高速分幅相机和 CCD 相机对强流电子束在空间和时间的分布进行了研究. 研究表明连续脉冲实验时, 离子体及其膨胀对发射电子束的强度和分布影响很大, 双脉冲时脉冲间隔时间内等离子体的膨胀速率约为 $8.17 \text{ cm}/\mu\text{s}$. 等离子体形成时没有优先位置, 电子束发射的局部增强位置是随机的. 结果表明碳纳米管阴极可以作为强流阴极在微波器件中得到应用.

关键词: 碳纳米管, 爆炸场发射, 等离子体膨胀, 强流电子束

PACC: 5260, 5280Q, 6148, 7970

1. 引 言

爆炸场发射阴极能够产生强流电子束, 因此一直是众多学者研究的热点^[1-10]. 这些阴极在高压脉冲电场中能产生强流电子束, 被称为爆炸电子发射. 场发射和热发射模型不能解释强流电子束的产生机理, 而强流电子束产生机理是场致等离子体发射. 首先在阴极表面形成等离子体, 然后电子在高压电场的作用下从等离子体中发射^[4-6]. 很多材料如天鹅绒、碳纤维等已经成功的作为爆炸发射阴极. 碳纳米管从被发现之初, 就因其纳米尺寸、高的长径比、好的导电性和优良的化学稳定性在场发射应用领域引起了广泛的研究^[11, 12]. 目前碳纳米管阴极在场发射显示器、加速器和 X 射线机等场发射器件上已经得到应用^[13-15]. 这些碳纳米管阴极的场发射研究主要都集中在直流发射领域, 最高发射电流密度在几 A/cm^2 左右, 这还不能满足强流电子束阴极的要求^[16]. 因此, 对碳纳米管在脉冲高压电场中的发射性能进行研究是非常有价值的.

本文采用简单的方法制备了大面积碳纳米管阴极, 并对碳纳米管阴极在双脉冲条件下的场发射性能进行了研究, 对阴极表面发射点的分布和密度进行了表征. 最后对碳纳米管阴极在爆炸发射时等离子体膨胀进行了研究. 本研究的结果为碳纳米管阴极在强流电子束源领域的应用提供了方法和理论.

2. 实 验

实验中采用化学气相沉积法制备的多壁碳纳米管(MWCNTs)作为制备阴极的场发射材料, 碳纳米管直径为 30 nm 左右. 将多壁碳纳米管和乙基纤维素、松油醇、乙醇等有机物混合均匀, 然后用超声波分散 60 min 得到碳纳米管浆料. 将获得的浆料采用涂敷到直径为 50.8 mm 的硅基片上, 硅基片表面预先沉积了 150 nm 厚的铁膜. 涂敷后将样品放在干燥箱中干燥, 干燥完毕后在 N_2 气氛保护炉中烧结. 烧结时, 先在 200°C 烧结 15 min , 然后升温到 800°C 烧结 60 min . 随炉冷却后得到硅基碳纳米管冷阴极. 然后将制备的阴极片装在一个铜平台上面, 阴极被一个

* 国家高技术研究发展(863)计划(批准号: 2006AA03Z351)和国家重大国际(地区)合作研究项目(批准号: 50620120439, 2006DFB51000)资助的课题.

† E-mail: yuezhang@ustb.edu.cn

开口直径为 50 mm 的铜环固定在铜台上面.脉冲发射测试时,阴极的发射面是一个直径为 50 mm 的圆.

碳纳米管阴极的脉冲发射性能在多脉冲功率系统中进行测试^[7],测试装置如图 1 所示.脉冲形成装置(PFN)输出双脉冲,脉冲的脉宽约为 100 ns,两极间距离为 65 mm,两个脉冲间隔大约为 400 ns.测试环境的真空度约为 1×10^{-3} Pa.多次测试时,两次双脉冲发射实验之间的间隔为 120 s.这个时间间隔足够保证每次双脉冲实验时阴极都能恢复到初始状态,上次测试时产生的残留物质不对下次测试产生影响.在阴极正面采用高速分幅相机对阴极发射时每次脉冲实验时两个连续脉冲的电子束在阴极表面的分布进行记录,分幅相机的曝光时间为 10 ns,两次曝光的时间间隔为 80 ns.同时对碳纳米管阴极发射时阴极面的发射光点分布采用 CCD(charge coupled device)相机在阴极侧面位置进行了图像记录,分析发射点的分布密度和均匀性.

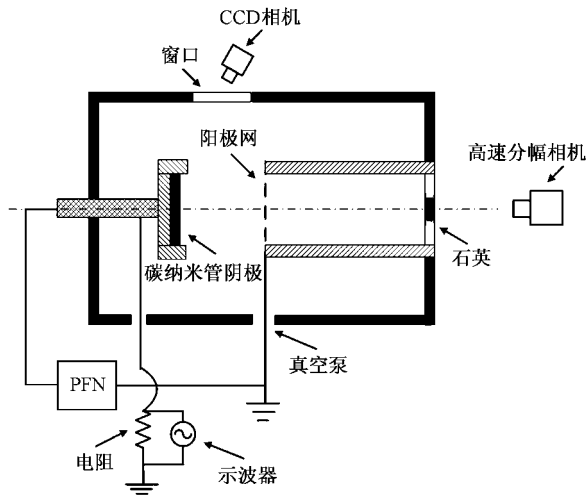


图 1 阴极测试系统示意图

3. 结果与讨论

图 2 中给出的是一次脉冲实验时典型脉冲电压和发射电流波形.两次连续脉冲的电压最高分别为 0.77 MV 和 0.5 MV.两次连续发射的电流相差很大.在第一个脉冲发射的电流为 0.81 kA,而第二次脉冲发射电流为 4.81 kA.第二个脉冲时,在 $7.69 \text{ V}/\mu\text{m}$ 的平均电场下,发射电流密度达到 $245 \text{ A}/\text{cm}^2$.两个脉冲发射的脉冲时间相当,第二个脉冲发射时,在低电场下获得了强发射电流.这个发射电流高于碳纤

维、天鹅绒等爆炸发射阴极的发射电流^[5].从发射电流曲线中可以知道,高压加载大约 40 ns 后阴极发射达到最高发射电流,阴极的开启时间约为 40 ns 左右.

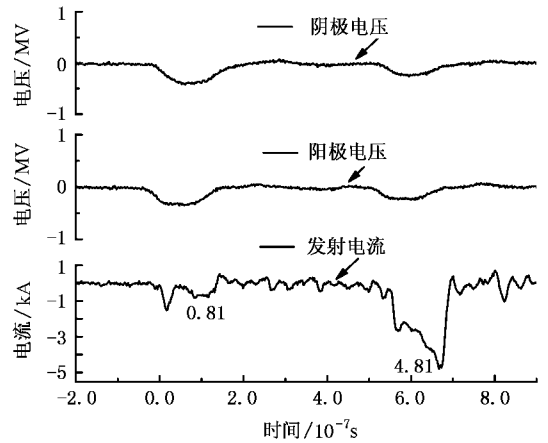


图 2 一次双脉冲发射实验中两极电压和发射电流的典型波形

根据爆炸电子发射理论,两个脉冲发射的发射电流的差距主要是因为是在发射过程中产生了阴极等离子体^[3-6].已有研究表明碳纳米管在高压脉冲电场下的电子发射是场致爆炸发射,在发射过程中产生了等离子体^[17].两个脉冲的发射电流波形差距很大.第一个脉冲发射电流曲线的开始阶段存在一个半波,这是由于场发射二极管的阻抗不匹配而造成的.第二个脉冲发射时,没有出现发射开始的半波,二极管的阻抗相匹配.由于等离子体的膨胀,第二个脉冲时二极管的阻抗与脉冲形成线的阻抗是匹配的.

从上面的发射电流波形已经知道脉冲间隔短连续脉冲发射时,脉冲电流变化很大.对短脉冲和短间隔的脉冲发射,可以通过高速分幅相机对每个脉冲发射时电子束分布进行观察.当电子在媒介中的传播速度超过光在该介质中的传播速度的时候,会发生切伦克夫辐射^[18].切伦克夫辐射在爆炸发射阴极的电子发射研究领域应用非常广泛^[19,20].通过高速分幅相机对电子在石英玻璃辐射的切伦克夫光进行记录可以研究电子束在空间的分布.图 3 所示的是两次连续脉冲电子束发射时辐射切连科夫光的高速分幅照片以及相应的亮度扫描曲线.图 3(a)和(b)是第一次脉冲时的结果.光亮分布在整個阴极面,亮度沿阴极面轴线呈高斯分布,整个阴极面都在发射电子.这个阴极电子束照片是在电压开始加载 80 ns 时获得,由于电压存在大约 40 ns 的上升过程,因此

可知碳纳米管阴极的开启时间为 40 ns 左右,这与电流波形得到的结果一致.图 3(c)和(d)是第二个脉冲发射的结果.电子束所产生的光强度非常不均匀,明显存在局部增强.照片中的光强表明了电子束的强度.从上面连续两次的脉冲发射的照片可以知道,第一个脉冲的发射电流虽然不强,但电子束发射

分布在整個阴极面,整个阴极面都在发射.第二次脉冲发射的电子束在中央强度非常高,阴极四周边缘发射比较弱.两次发射的电子束强度和分布是不同的.在两个脉冲的间隔时间内,等离子体向阳极膨胀,减小了二极管的间隙,引起了电场增强.因此第二个脉冲发射电流增加而且电子束分布不均匀.

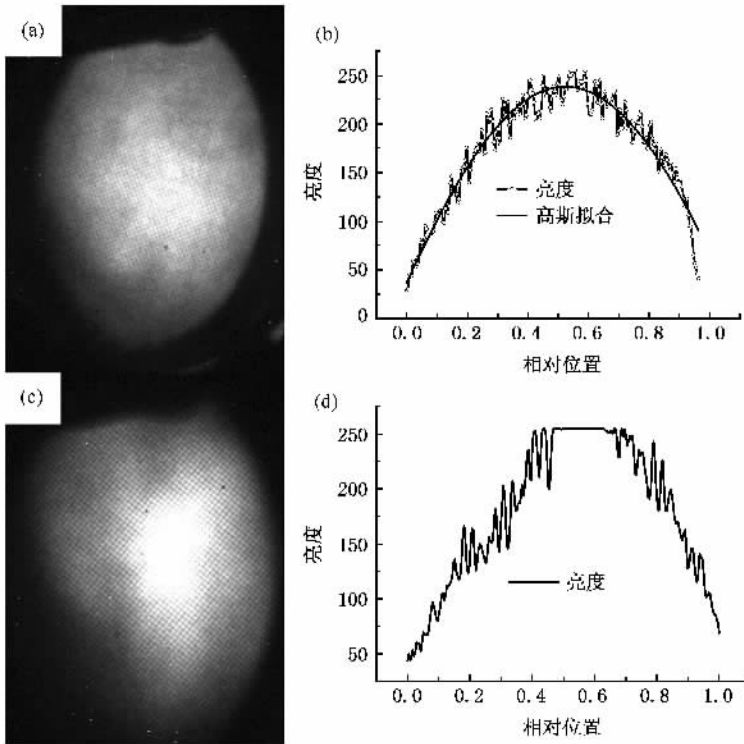


图 3 两次连续脉冲发射时的电子束分布的高速分幅照片以及相应的亮度扫描曲线

图 4 所示的是碳纳米管阴极连续 5 次双脉冲测试时,最大发射电流时阴极等离子体发光的 CCD 照片.CCD 照片中显示了阴极面发射时等离子体在阴极面上的分布.发光的位置也是每次最高发射电流时强流电子束发射的位置.由于二极管间隙间产生的等离子体及其分布的不稳定,导致电子发射强度和分布的不均匀.在不同的脉冲发射时,等离子体和

电子束发射的位置是不固定和随机的.

不同的脉冲发射时,阴极面的发射点的数目和有效发射面积是不同的.不同实验时的发射电流除了受等离子体影响外,阴极整体发射电流的强弱还与表面的发射位置数量和有效发射面积大小有关.发射位置多,阴极的有效发射面大,会使阴极在相同的电场条件下产生大的发射电流.由于脉冲过程的

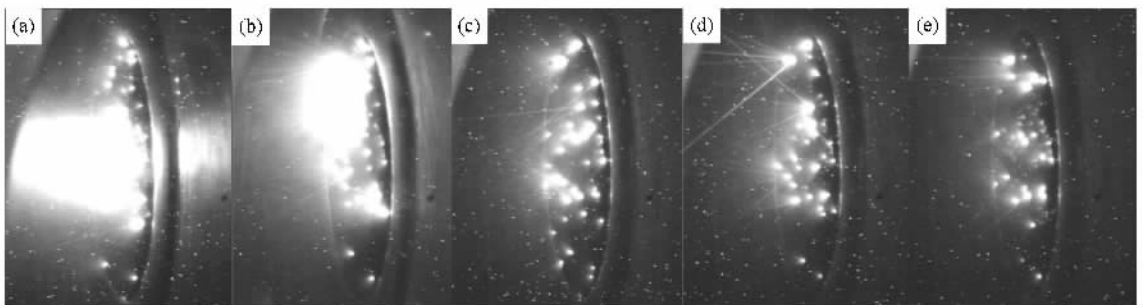


图 4 连续 5 次脉冲发射时碳纳米管阴极表面的等离子体 CCD 照片

持续,会导致表面有些发射体脱落或失效,导致有效发射位置数量减少,有效的发射面积降低,发射电流降低.阴极面的有效发射面积直接影响了脉冲发射电流的强度.图 4 给出了发射面积从大变小的一组演变过程,发射电流的强度也应该相应从强到弱.从 CCD 相机已知表面等离子体和电子束发射位置的分布.碳纳米管阴极在电子发射过程中的等离子体分布与 Saveliev 等人报道的天鹅绒阴极等离子体的分布不同^[8-10].阴极四周边缘部位不是等离子体易于产生的地方,等离子体可出现在阴极面任何地方.因此碳纳米管阴极在爆炸发射中,等离子体的产生没有择优位置.

从上面的分析可以知道,在脉冲发射过程中产生了等离子体,在脉冲过程中对等离子体的膨胀速率进行表征是非常困难的.因此需要简化和假设过程,对阴极等离子体的膨胀进行研究^[3].由于在脉冲发射时产生了阴极等离子体,引起发射性能改变,这都可以归结为二极管导流系数的改变.在脉冲发射时,Child-Langmuir 公式通常用来表征 $I-V$ 关系^[21,22].

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{I}{V_d^{3/2}} \\ &= \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{\pi r_{\text{eff}}^2}{d_{\text{eff},i}^2} \right) \\ &= 2.33 \times 10^{-6} \left(\frac{\pi r_{\text{eff}}^2}{d_{\text{eff},i}^2} \right), \quad (1) \end{aligned}$$

式中, P_i 是二极管导流系数, I 是二极管电流, V_d 是二极管电压, m 是电子质量, $d_{\text{eff},i}$ 是二极管有效间距, r_{eff} 是有效阳极半径.

当第一个脉冲电子束发射时,等离子体产生并且膨胀改变了二极管有效间距

$$d_{\text{eff},2} = d_1 - v_{f,i} t, \quad (2)$$

$d_{\text{eff},i}$ 是二极管有效间距, t 是脉冲间隔时间, $v_{f,i}$ 是等离子体的有效膨胀速率.

I 和 V_d 可测,因此 P_i 是已知的.利用已知的起始二极管间距 $d_{\text{eff},1}$, I_1 和 $V_{d,1}$,可以计算获得 P_1 和 r_{eff} . P_1 , I_1 , $V_{d,1}$ 和 r_{eff} 是第一次脉冲发射时的导流系数、发射电流强度、二极管间距和有效阳极半径.假定 r_{eff} 在以后的连续脉冲中保持不变.根据(1)式和 I_2 , $V_{d,2}$,可以计算出 $d_{\text{eff},2}$ 和 P_2 .根据(2)式,可以计算出 $v_{f,i}$.

根据以上假设和理论,通过测试的脉冲电压和电流可以获得一系列的结果.表 1 中是典型的 5 次双脉冲实验的计算结果.5 次实验之间的间隔时间足够长,保证阴极每次都是恢复到相同的初始状态后开始实验的,因此每次实验的发射电流不会受其他实验的影响.在一次实验中的两个双脉冲发射电流的不同是由于等离子体的膨胀造成的.通过计算可以知道在双脉冲条件下,两个脉冲之间的等离子体膨胀速率为 8.17 cm/ μ s 左右.碳纳米管阴极发射的等离子体膨胀速率高于天鹅绒阴极发射时的膨胀速率^[3-6],也导致了两个脉冲的发射电流相差比较大.可以通过对阴极除气、降低发射电流、提高真空度等手段降低碳纳米管阴极爆炸发射时等离子体膨胀速率.

脉冲发射电流的强弱除了受到等离子体膨胀的影响以外,还与阴极发射时的有效发射面积大小和发射点数目有关.由于脉冲过程的持续,会导致表面有些发射体脱落或失效,导致有效发射位置数量减少,有效的发射面积缩小,发射电流降低.表中 5 次实验的第二次脉冲发射电流与图 4 中 CCD 照片对应.对比照片与发射电流发现,随着阴极发射面积的缩小,阴极发射电流的强度也应该相应从强到弱.由于阴极表面的有些发射体在高压脉冲的作用下,阴极发射体发射脱落或失效,阴极的有效发射面积减小,导致阴极在阴阳极间距相对小的条件下未能获得大的发射电流.

表 1 碳纳米管阴极爆炸发射时获得的典型发射结果

实验次数	脉冲	电流/kA	电压/MV	$r_{a, \text{eff}}/m$	P/perv	d_{eff}/m	$V_c/(cm/\mu s)$
1	1	0.81	0.77	0.026	1.20×10^{-6}	0.065	7.91
	2	4.81	0.5		1.36×10^{-5}	0.0191	
2	1	0.69	0.76	0.025	1.04×10^{-6}	0.065	8.16
	2	4.23	0.49		1.23×10^{-5}	0.0193	
3	1	0.57	0.72	0.023	9.33×10^{-7}	0.065	7.98
	2	4.26	0.47		1.32×10^{-5}	0.0171	
4	1	0.48	0.72	0.021	7.86×10^{-7}	0.065	8.56
	2	3.34	0.42		1.23×10^{-5}	0.0162	
5	1	0.65	0.77	0.024	9.62×10^{-7}	0.065	8.22
	2	2.69	0.51		7.39×10^{-6}	0.0239	

4. 结 论

本文制备了一种大面积的碳纳米管阴极,并对该阴极在双脉冲条件下的爆炸发射性能进行了研究.碳纳米管阴极在最高电场为 $7.69 \text{ V}/\mu\text{m}$ 的双脉冲条件下,获得了 $245 \text{ A}/\text{cm}^2$ 的强电流密度发射.在加载高压过程中,阴极开启时间大约为 40 ns ,形成

阴极等离子体.对场致等离子体发射电子束的强度和空间分布进行了分析,阴极等离子体的产生没有择优位置,在阴极面的产生是随机的.碳纳米管阴极产生的等离子体在脉冲间的膨胀速率为 $8.17 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 左右.研究结果表明碳纳米管阴极可以作为一种新型阴极在行波管和加速器等高能微波器件领域得到应用.

- [1] Yang H L , QIU A C , Zhang J S , He X P , Sun J F , Peng J C , Tang J P , Ren S Q , Ouyang X P , Zhang G G , Huang J J , Yang L , Wang H Y , Li H Y , Li J Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 406 (in Chinese) [杨海亮、邱爱慈、张嘉生、何小平、孙剑锋、彭建昌、汤俊萍、任书庆、欧阳晓平、张国光、黄建军、杨 莉、王海洋、李洪玉、李静雅 2004 物理学报 **53** 406]
- [2] Wo D , Gong Y , Liu J Y , Wang X G , Liu Y , Ma T C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3501 (in Chinese) [吴 迪、宫 野、刘金远、王晓钢、刘 悦、马腾才 2006 物理学报 **55** 3501]
- [3] Xia L S , Wang M , Huang Z P , Zhang K Z , Shi J S , Zhang L W , Deng J J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3435 (in Chinese) [夏连胜、王 勳、黄子平、张开志、石金水、章林文、邓建军 2004 物理学报 **53** 3435]
- [4] Miller R B 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 3880
- [5] Krasik Y E , Dunaevsky A , Krokhmal A , Felsteiner J 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 2379
- [6] Shiffle D , Heggemeier J , LaCour M , Golby K , Ruebush M 2004 *Phys. Plas.* **11** 1680
- [7] Xia L S , Zhang H , Jiang X G , Yang A M , Li C G , Wang Y , Pang H F , Zhang K Z , Shi J S , Zhang L W , Deng J J 2006 *High Energy Physics & Nuclear Physics* **30** 470 (in Chinese) [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 2006 高能物理与核物理 **30** 470]
- [8] Xia L S , Zhang H , Chen D B , Zhang K Z , Shi J S , Zhang L W 2005 *Chin. Phys.* **14** 1779
- [9] Saveliev Y M , Sibbett W , Parkes D M 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 5776
- [10] Saveliev Y M , Sibbett W , Parkes D M 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 7416
- [11] Iijima S 1991 *Nature* **56** 354
- [12] De Heer W A , Chatelain A , Ugarte D 1995 *Science* **270** 1179
- [13] Choi W B , Chung D S , Kang J H , Kim H Y , Jin Y W , Han I T , Lee Y H , Jung J E , Lee N S , Park G S , Kim J M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 3129
- [14] Liu Z , Yang G , Lee YZ , Bordleon D , Lu J , Zhou O 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 103111
- [15] Yuan Y H , Miao R C , Bai J T , Hou X 2006 *Chin. Phys.* **15** 2761
- [16] Zhu W , Bower C , Zhou O , Kochanski G , Jin S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 873
- [17] Sergej K 2002 *AIP Conference Proceedings* **650** 385
- [18] Jelly J V 1955 *Br. J. Appl. Phys.* **6** 227
- [19] Hartemann F , Bekefi G 1986 *J. Appl. Phys.* **49** 1680
- [20] Bekefi G , Hartemann F , Kirkpatrick D 1987 *J. Appl. Phys.* **52** 1564
- [21] Child C D 1911 *Phys. Rev.* **32** 492
- [22] Langmuir I , Blodgett K B 1924 *Phys. Rev.* **24** 49

Short-pulsed explosive field emission and plasma expansion of carbon nanotube cathodes *

Liao Qing-Liang¹⁾ Zhang Yue^{1,2)†} Huang Yun-Hua¹⁾ Qi Jun-Jie¹⁾

Gao Zhan-Jun¹⁾ Xia Lian-Sheng³⁾ Zhang Huang³⁾

¹⁾ *Department of Materials Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*

²⁾ *State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*

³⁾ *Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 16 February 2007 ; revised manuscript received 17 June 2007)

Abstract

A large area cold cathode based on carbon nanotube films has been successfully fabricated. Investigation of the explosive field emission properties of the carbon nanotube cathode in a double-pulse mode was carried out and a high emission current density of 245 A/cm^2 was obtained. The turn-on time of the CNT cathode is about 40 ns. The time- and space-resolution of the electron beam emitted from the cathode was investigated. The formation of the cathode plasma layer was proved and the plasma expanded at a velocity of $\sim 8.17 \text{ cm}/\mu\text{s}$ toward the anode. The plasma has big influences on the intensity and distribution of electron beams. The formation of cathode plasma had no preferential position and the local enhancement of electron beams was random. This carbon nanotube cathode appears to be suitable for high-power microwave device applications.

Keywords : carbon nanotubes , explosive field emission , plasma expansion , intense electron beam

PACC : 5260 , 5280Q , 6148 , 7970

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03Z351) and the Major International (Regional) Joint Research Program of China (Grant Nos. 50620120439 , 2006DFB51000).

† Corresponding author. E-mail : yuezhang@ustb.edu.cn