

# 碳纳米管阴极强流脉冲发射放气特性研究\*

湛怡<sup>†</sup> 张篁 杨安民 夏连胜 刘星光

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2011年5月31日收到; 2011年8月16日收到修改稿)

为了研究碳纳米管(CNT)阴极强流脉冲发射特性,在2MeV直线感应加速器(LIA)注入器平台上开展了阴极放气特性实验. 研究表明:碳纳米管阴极强流发射时伴随有严重的阴极放气,阴极放气参与形成阴极等离子体. 对于特定的几次实验,通过数值积分估算了阴极材料的放气量为0.8—1.12Pa·L,释放的气体分子数目与电子数目之比为254—203,说明阴极等离子体为弱电离等离子体. 分析了二极管电压、发射电流密度、放气量以及放气分子数目/电子数目之间的关系

**关键词:** 碳纳米管阴极, 强流脉冲发射, 放气特性, 直线感应加速器

**PACS:** 29.25.Bx, 61.48.+c, 07.30.Dz, 29.20.Ej

## 1 引言

在强流电子加速器和高功率微波领域,强流电子束源是各系统的核心. 而阴极发射材料又是强流电子束源的核心,所以强流电子束阴极成为实用系统研制的一项关键技术,它主要包括发射材料、制造技术、器件几何结构和发射机理等几个方面. 高电流密度、高亮度强流电子束源能够极大地提高相关设备的性能. 目前,在强流电子束源中应用较多的是热阴极<sup>[1]</sup>、天鹅绒阴极<sup>[2]</sup>和碳纤维阴极<sup>[3]</sup>. 然而,由于热阴极发射电流密度较小、容易中毒、寿命短,而天鹅绒与碳纤维等阴极的发射阈值较低、发射电流密度较大、成本较低. 因此,天鹅绒与碳纤维阴极就被广泛地应用于强流加速器和高功率微波管等领域.

但是天鹅绒与碳纤维等阴极在强流脉冲发射时又存在一个共同的缺点:由于阴极材料容易吸附气体,在脉冲场强下,吸附的气体经过离子化形成阴极等离子体<sup>[2,3]</sup>,产生的阴极等离子体在脉冲高压期间向阳极膨胀,等离子体的膨胀将改变二极管间隙的状态,严重影响后续电子束的束品质(对于多脉冲和长脉冲电子束情况尤为严重),因此探索新的冷阴极材料势在必行. 纳米材料科学的快速发展为寻找新的冷阴极提供了机遇. 目前已经能够制备的纳米材料阴极有纳米 ZnO 薄膜阴极<sup>[4]</sup>、碳纳

米管阴极等<sup>[5,6]</sup>. 碳纳米管(carbon nanotube, CNT)是一种新型的阴极发射材料<sup>[7]</sup>,在直流场发射领域的研究已发现碳纳米管具有很多优点,包括发射阈值低、发射电流密度大、发射性能稳定等<sup>[8-11]</sup>. 而在强流发射领域的研究还不全面<sup>[12-15]</sup>,因此本文基于2MeV LIA注入器平台,开展碳纳米管阴极强流脉冲发射放气特性研究,探索碳纳米管阴极的强流脉冲发射特性与直流发射特性的是否具有相似点,强流脉冲发射时是否具有较小的阴极放气,是否能够利用纯粹的场致发射特性来获得强流电子束. 但是实验结果表明碳纳米管与天鹅绒和碳纤维一样容易吸附气体,在阴极强流脉冲发射时伴随有严重的阴极放气.

## 2 实验装置与布局

实验是在2MeV LIA注入器平台上进行的,图1是2MeV LIA注入器平台实验装置示意图,图2是制备的碳纳米管阴极固定在阴极铜座上后安装到阴极头的照片. 2 MeV LIA注入器二极管区容积约为1550L,工作在二极管区的分子泵有6台,能够提供的抽速约为4700L/s,考虑真空管道的流导以后,实际有效抽速约为3760L/s. 实验在真空度为 $1.7 \times 10^{-4}$ — $7.0 \times 10^{-4}$  Pa的条件下开展. 利用CCD相机观察阴极发射面电子发射情况,分析

\* 北京科技大学新金属材料国家重点实验室基金(批准号:20082D-10)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: shenygo@163.com

碳纳米管阴极的发射过程、发射点的分布与放气的关系.

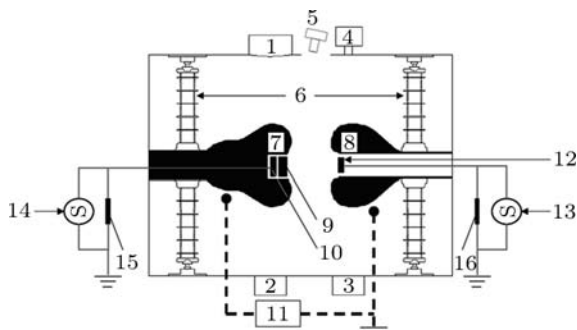


图 1 2MeV LIA 注入器实验装置示意图 (1, 2, 3 为分子泵; 4 为电离真空规; 5 为 CCD 相机; 6 为绝缘支撑; 7 为阴极头; 8 为阳极头; 9 为碳纳米管阴极; 10 为取样电阻环; 11 为脉冲功率系统; 12 为法拉第筒; 13, 14 为示波器; 15, 16 为电阻)

二极管电压  $U_d$  的测量方式是间接测量, 通过各感应腔电压信号的叠加得到二极管电压. 阴极电流  $I_k$  采用取样电阻环测量, 该电阻环是由 48 个  $10\Omega$  的电阻并联而成, 位于阴极头内部靠近阴极附近的阴极连接筒内, 这样就可以避免在阴极杆尾部测量发射电流引入的“位移电流”<sup>[16]</sup>(若电阻环位于阴极杆尾部, 当从分布参数的角度考虑时, 入射电压波和反射电压波由于存在较长的时间差, 入射电压波和反射电压波叠加以后就会出现“一负一正”的电压信号, 因此对应电压波形的前后沿就会出现“位移电流”信号). 阳极电流  $I_a$  采用位于阳极孔内的法拉第筒测量, 法拉第筒的电子收集电极材料为钨, 阴极发射出来的电子束进入阳极孔后会运动到收集电极上, 电流流过取样电阻, 测量取样电阻两端的电压就可以直接计算出收集到的电流大小. 以上得到的电压信号进行积分、电流信号进行一定的分压以后, 直接由示波器采集.

为了能够实时监测真空室内压强的变化, 将电离真空规输出的模拟电压信号经低通滤波后直接

在示波器上提取 (采用低通滤波主要是排除脉冲放电引起的高频噪声), 在检测的压强为  $10^{-4}$ — $10^{-3}\text{Pa}$  范围内, 输出电压信号  $U(\text{V})$  随真空压强  $p(\text{Pa})$  呈对数变化关系, 其定标关系为

$$U = 6.25 + 0.326 \times \ln p. \quad (1)$$

因此, 根据示波器中采集到的电压波形即得到了气压实时变化信息. 由于电离真空规输出信号电压一般在 2—4V 左右 (真空度为  $10^{-4}$ — $10^{-3}\text{Pa}$ ), 而脉冲放电引起的信号电压的变化一般在 0.05V 左右, 相对于输入信号电压属于小信号, 示波器在采集信号的时候很容易引入噪声. 因此在数据处理时对原始信号采用数字低通滤波处理和邻近平均处理.

### 3 实验结果及讨论

图 3(a) 原始信号电压经过数字低通滤波和邻近平均处理以后的信号, 图 3(b) 是原始信号电压经过 2.5 Hz 数字低通滤波以后的信号, 再经过 (1) 式计算出室内真空压强的变化. 可以看到, 碳纳米管阴极脉冲放电引起了真空室压强的明显变化, 放电瞬间阴极释放大量的吸附气体 (文献 [17] 详细说明了碳纳米管阴极强流脉冲发射时释放的气体主要来自于阴极材料所吸附的气体), 小部分释放出来的气体首先是被电离形成阴极等离子体, 当从阴极等离子体中引出电子以后, 正离子与其他电子复合 (这里的电子包括地电流提供的电子与未能从阴极等离子体中引出的电子), 形成中性气体, 这些中性气体与未参与电离的气体经过一定的时间扩散到分子泵口处被抽走, 扩散到电离真空规处被监测到. 从图 3 还可以看到, 分子泵抽走阴极材料的释放气体大概需要 3—4 s.

根据标定关系可以反推压强随时间的变化, 对

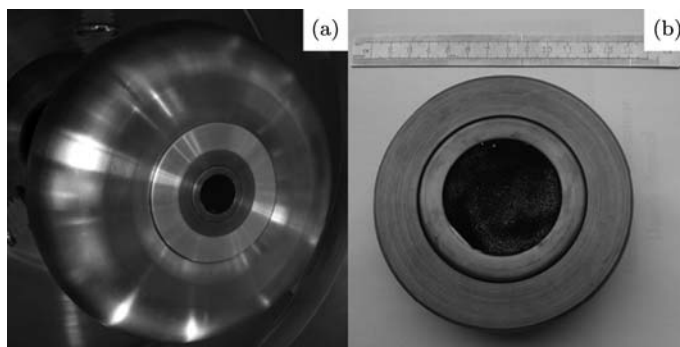


图 2 2 MeV LIA 注入器阴极 (a) 阴极头; (b) 碳纳米管阴极

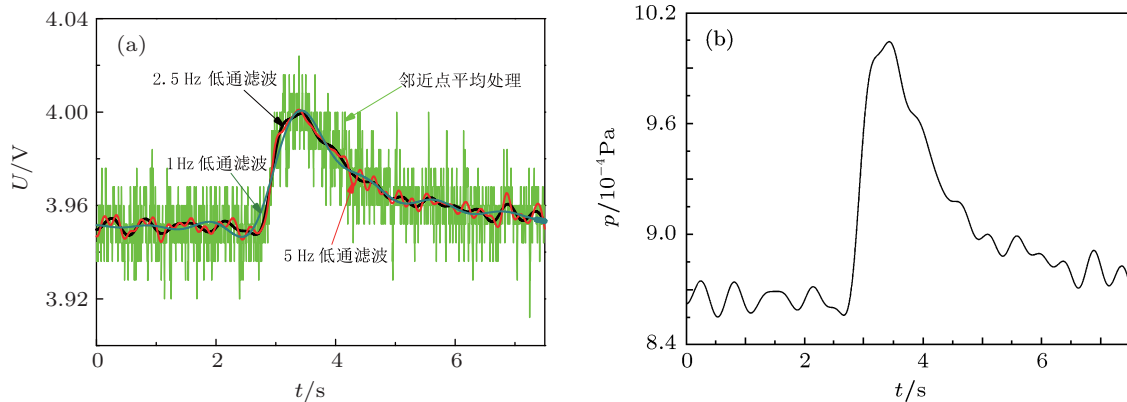


图3 数字处理后的信号电压与真空室压强变化 (a) 电离真空规输出信号电压; (b) 真空室压强变化

压强在时间上积分可以计算放气总量

$$\Delta Q = \int (p_t - p_0) \times S_e dt, \quad (2)$$

式中  $\Delta Q$  的单位是  $\text{Pa}\cdot\text{L}$ ,  $p_t$  是随时间变化的压强值,  $p_0$  是脉冲放电前室内真空的本底压强值,  $S_e$  是真空泵的有效抽速, 单位为  $\text{L/s}$ . 分子流情况下, 有效抽速  $S_e$  可由下式计算出:

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C}, \quad (3)$$

式中,  $S_p$  是真空泵的抽速,  $C$  是真空管道的流导, 单位为  $\text{L/s}$ .

通过以上公式计算出此次放电引起电离真空规监测到的阴极放气量为  $\Delta Q = 2.45 \times 10^{-4} S_e = 0.92 \text{Pa}\cdot\text{L}$ . 图 4 是此次实验对应的二极管电压、阴极电流和阳极电流波形. 通道 1 是二极管电压:  $U_d = 1.61 \text{MV}$ , 通道 2 是阳极电流:  $I_a = 482 \text{A}$ , 通道 3 是阴极电流:  $I_k = 1961 \text{A}$ .

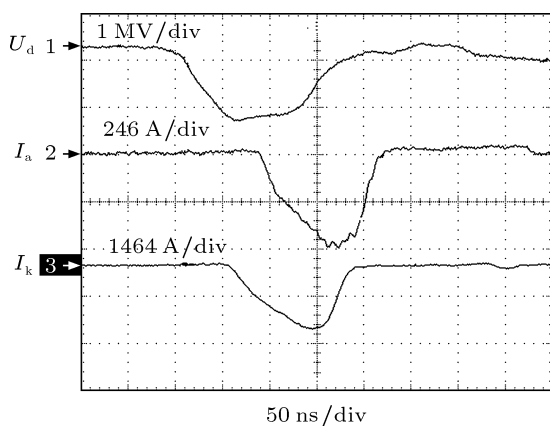


图4 碳纳米管阴极强流脉冲发射波形

图 5 是在不同二极管电压下, 碳纳米管阴极强流脉冲发射所引起的压强变化. 通过对压强的数值积分, 得到 6 次放电的放气量为  $0.84\text{—}1.12 \text{Pa}\cdot\text{L}$ . 不同的二极管电压加载到碳纳米管阴极时, 对阴极尖端的加热程度不同 [18], 放气量大小也就不同, 当发射电流达到  $2.5 \text{kA}$  时, 最大放气量为  $1.12 \text{Pa}\cdot\text{L}$ . 表 1 列举了 6 次实验的相关数据. 另外, 根据理想气体状态方程  $pV = nRT$  可以计算出放气分子数目, 通过阴极电流又能够计算出各次发射的电子数目. 从而估算出 6 次实验的放气分子数目与发射电子数目之比  $\eta$  为  $254\text{—}203$ . 这说明阴极材料释放的气体大部分未电离, 阴极等离子体为弱电离子体 (实际上, 在二极管脉冲放电的初始阶段内, 阴极产生的等离子体即为弱电离子体, 在弱电离子体中, 含有大量的中性粒子), 这与文献 [19] 报道阴极强流发射时形成的阴极等离子体是弱电离子体的结论相符合.

上述实验结果中放气分子数目与电子数目之比为  $254\text{—}203$ , 这个数值要远远大于文献 [2,14] 报道的天鹅绒阴极与碳纳米管阴极作为强流电子束源应用在高功率微波管时 3—5 的放气分子数目与电子数目之比. 推测其主要原因是在  $2 \text{MeV}$  LIA 注入器平台上开展都是单脉冲模式的实验, 高功率微波管中使用的是阴极需要以一定的重复频率放电, 其放电次数远远大于 LIA, 放电次数增多, 放气量逐渐变小; 另外一个因素是  $2 \text{MeV}$  LIA 注入器的引出能力, 由于等离子体发射过程是一个空间电荷限制流发射过程, 即使碳纳米管阴极脉冲放电能够引起较大阴极的放气量, 形成较大的阴极等离子体密度 (此等离子体仍为弱电离子体), 但二极管引出能力不够, 也仅有少部分电子能够从阴极等离子体鞘层中引出.

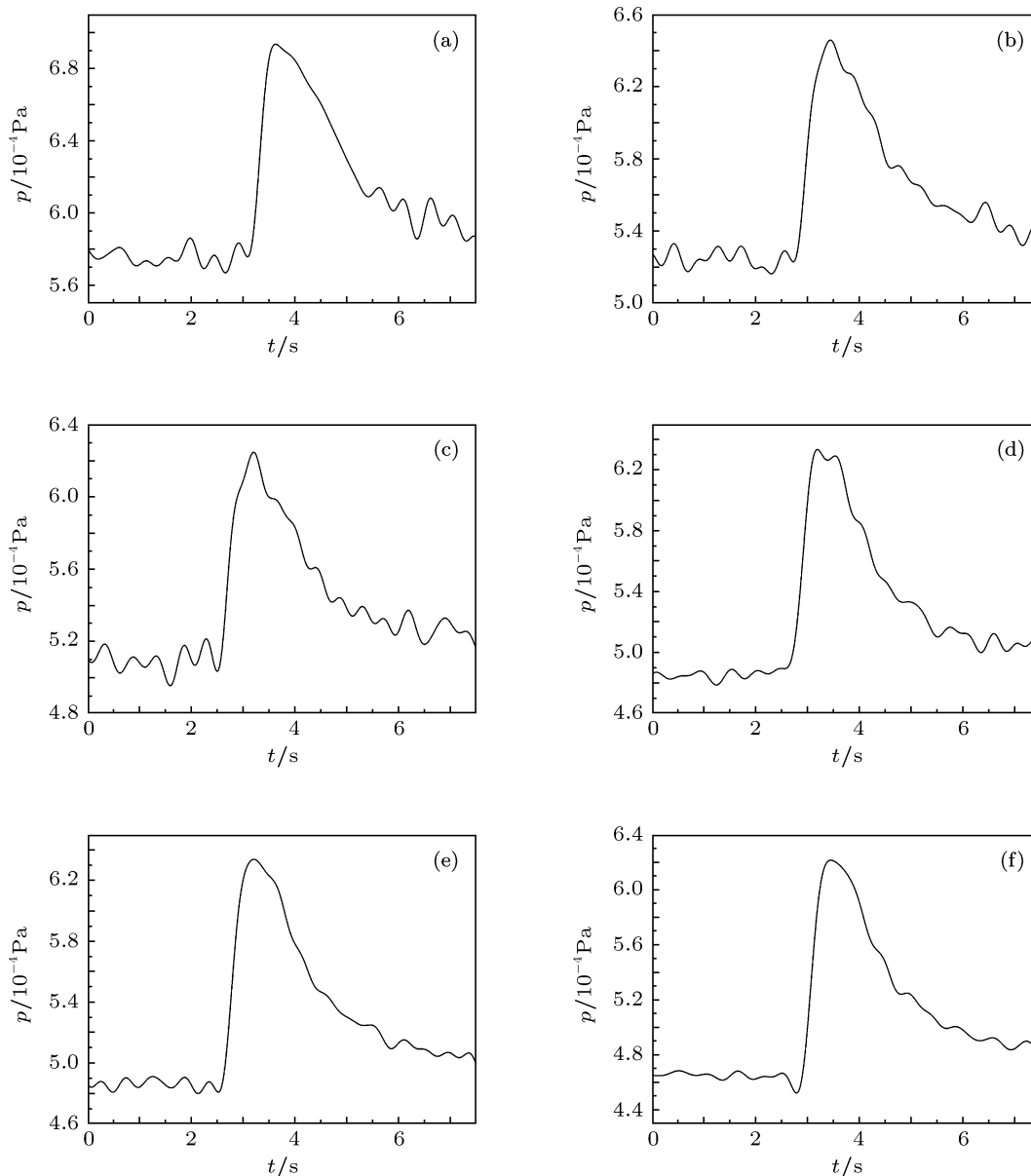


图 5 不同二极管电压放电时的压强变化 (a)  $U_d = 1.47$  MV; (b)  $U_d = 1.54$  MV; (c)  $U_d = 1.58$  MV; (d)  $U_d = 1.62$  MV; (e)  $U_d = 1.63$  MV; (f)  $U_d = 1.64$  MV

表 1 不同二极管电压放电的相关数据

实验数	$U_d$ /MV	$I_a$ /kA	$I_k$ /kA	$j_e/(A/cm^2)$	$\Delta Q/Pa \cdot L$	$\eta$
5287	1.47	0.36	1.61	89.0	0.84	254
5289	1.54	0.43	1.67	92.3	0.82	251
5290	1.58	0.50	1.80	99.4	0.80	216
5292	1.62	0.55	2.31	127.6	1.05	227
5293	1.63	0.58	2.46	136.0	1.03	203
5295	1.64	0.57	2.49	137.6	1.12	218

图 6(a) 是 CCD 相机俘获到的碳纳米管阴极本

底照片, 图 6(b)—(e) 分别是在二极管电压为 1.54 MV, 1.58 MV, 1.62 MV, 1.64 MV 放电时的阴极等离子体发光照片. 可以看到, 碳纳米管阴极强流脉冲发射时, 阴极等离子体分布较均匀, 基本上在整个阴极面都能够观察到等离子体发光, 引出的自由电子正是来自于图中的各发光区域. 其中, 图中“小亮点”是测试系统对 CCD 相机的干扰噪声. 另外, 在不同二极管电压下, 阴极等离子体发光强弱有微小区别. 二极管电压越高, 放气量越大, 等离子体发光越强、分布越均匀.

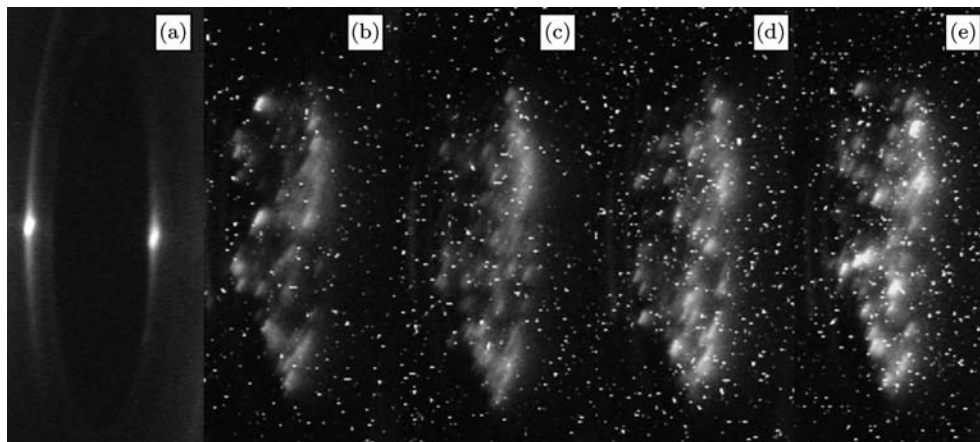


图6 CCD相机采集到的照片 (a) 本底照片; (b)  $U_d = 1.54\text{MV}$ ; (c)  $U_d = 1.58\text{MV}$ ; (d)  $U_d = 1.62\text{MV}$ ; (e)  $U_d = 1.64\text{MV}$

图7是在真空度优于  $4.6 \times 10^{-4}\text{Pa}$  的情况下, 二极管电压、发射电流密度与放气量的关系. 由图7(a)可知, 发射电流密度  $j_e$  随二极管电压  $U_d$  单调递增, 在  $1.64\text{MV}$  的二极管电压时, 最大阴极发射电流密度达  $137.6\text{A}/\text{cm}^2$ . 图7(b)是二极管电压  $U_d$  与放气量  $\Delta Q$  的关系, 在  $1.47\text{—}1.58\text{MV}$  的二极管电压下, 放气量出现减少的现象主要是因为随着实验次数的增加, 放气量在逐渐减少. 同时, 真空室压强也在降低, 由于阴极材料与真空室存在一个“吸附—解吸”的动态过程, 因此它们之间的气体交换量变少, 这将导致阴极发射时释放的气体变少.

当二极管电压升高 (二极管电压为  $1.62\text{—}1.64\text{MV}$ ), 阴极材料放气量明显增加. 这是因为较高的二极管电压能够引起更显著的阴极尖端加热, 引起的阴极材料温升越明显, 阴极材料的气体释放量就越大. 图7(c)是二极管电压  $U_d$  与放气分子数/发射电子数  $\eta$  的关系, 可以发现: 二极管电压越高, 放气分子数/发射电子数反而变小, 这是因为较高的二极管电压相对于较低的二极管电压来说, 能够引起释放气体更程度的电离. 图7(d)是发射电流密度  $j_e$  与放气量  $\Delta Q$  的关系, 两者之间存在的关系类似于二极管电压与放气量的关系.

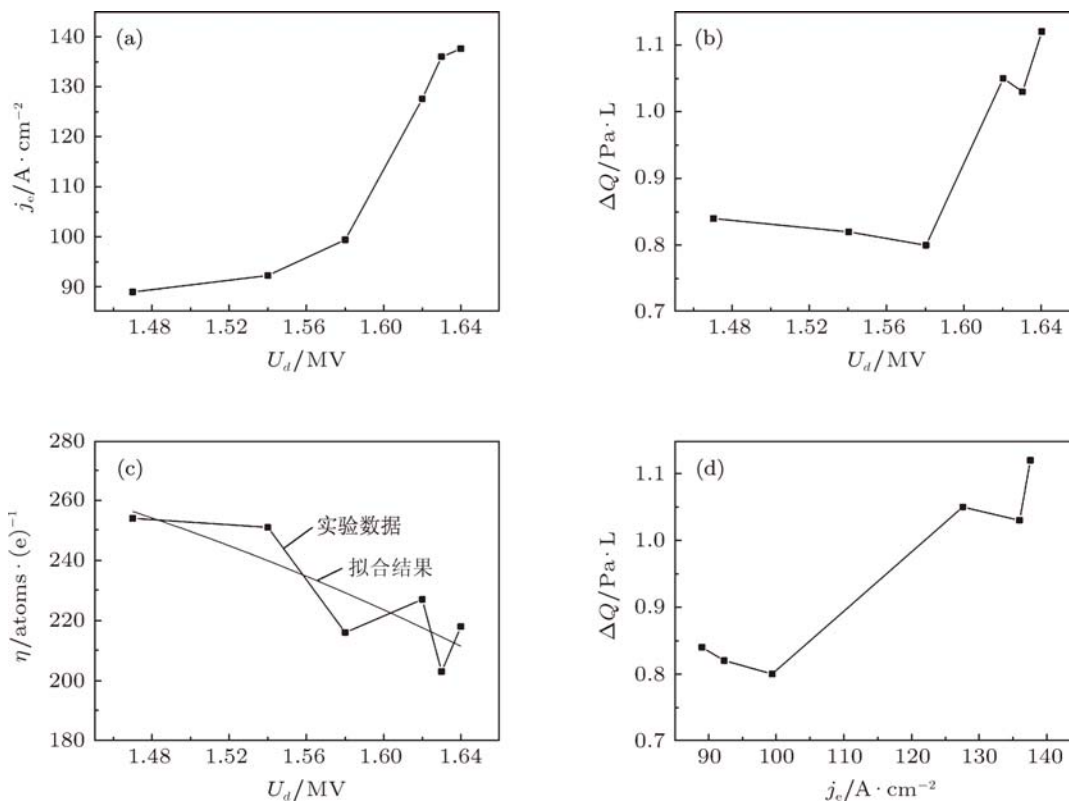


图7 各物理量的关系 (a)  $j_e$ - $U_d$  关系; (b)  $\Delta Q$ - $U_d$  关系; (c)  $\eta$ - $U_d$  关系; (d)  $j_e$ - $\Delta Q$  关系

碳纳米管阴极强流脉冲发射引起的阴极材料放气量与二极管电压与发射电流密度都不存在正比关系. 提高二极管电压能够引起放气量的增加, 但是随着实验次数的增加, 阴极材料与真空室的气体交换量又在逐渐减少, 最后出现放气量随着二极管电压快速增加但放气量平缓增长的现象(放气量与发射电流密度也有类似的关系).

实际上, 数值积分得到的放气量包括三部分: 第一部分是注入器脉冲放电引起的二极管各种材料放气, 包括阴极材料、不锈钢材料、绝缘子材料等引起的放气. 第二部分是等离子体复合气体, 从阴极材料释放出来的气体在电离之后形成阴极等离子体, 由于二极管引出能力不够大, 还有很大一部分电子将参与等离子体复合, 形成的各种气体成分(地电流提供的电子也将参与等离子体复合), 这些气体成分将快速的向分子泵口扩散. 第三部分是从阴极引出的电子束轰击阳极材料(钨材料法拉第筒、不锈钢材料的阳极头)而引起的放气(阳极材料放气是少量的, 因为在开展的热阴极实验时, 1 kA 左右的电子束轰击阳极法拉第筒, 不能够观察明显的真空室压强跳变). 其中, 阴极材

料释放的未参与电离的气体是引起真空室压强跳变的主要原因.

## 4 结 论

利用 2 MeV LIA 注入器平台, 研究了大面积碳纳米管阴极强流脉冲发射放气特性. 实验结果表明: 碳纳米管阴极发射时伴随有严重的阴极放气, 阴极材料释放的气体参与形成阴极等离子体. 阴极材料的放气引起了真空室压强跳变, 通过对压强变化曲线的数值积分, 估算了阴极材料放气量为 0.8—1.12 Pa·L, 释放的气体分子数目与电子数目之比为 254—203, 因此阴极等离子体为弱电离等离子体. 不同二极管电压放电时, 伴随有不同大小的阴极材料放气量以及不同强度的阴极等离子体发光. 分析得到以下结论: 二极管电压越大, 阴极材料放气量越大, 阴极等离子体密度越大, 等离子体发光越强, 发射电流密度越大, 放气分子数/发射电子数越小.

感谢北京科技大学新金属材料国家重点实验室为本文工作提供的碳纳米管阴极样品.

- 
- [1] Yang A M, Xia L S, Zhang H, Zhang K Z, Shi J S, Deng J J 2008 *Chin. Phys. C* **32** 286
- [2] Miller R B 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 3880
- [3] Shiffler D A, LaCour M J, Sena M D, Mitchell M D, Haworth M D, Hendricks K J, Spencer T A 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 517
- [4] Liao Q L, Yang Y, Xia L S, Qi J J, Zhang Y, Huang Y H, Qin Z 2008 *Phys. Plasmas* **15** 114505
- [5] Liao Q L, Zhang Y, Xia L S, Huang Y H, Qi J J, Gao Z J, Zhang H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5335 (in Chinese) [廖庆亮, 张跃, 夏连胜, 黄运华, 齐俊杰, 高战军, 张篁 2007 物理学报 **56** 5335]
- [6] Li D C, Dai L M, Huang S M, Mau A W H, Wang Z L 2000 *Chem. Phys. Lett.* **316** 349
- [7] Milne W I, Teo K B K, Amaratunga G A J, Legagneux P, Gangloff L, Schnell J P, Semet V, Binh V T, Groening O 2004 *J. Mater. Chem.* **14** 1
- [8] Endo M, Hayashi T, Kim Y A, Terrones M, Dresselhaus M S 2004 *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **362** 2223
- [9] Saito Y, Hamaguchi K, Mizushima R, Uemura S, Nagasakob T, Yotani J, Shimojo T 1999 *Appl. Surf. Sci.* **146** 305
- [10] Murakami H, Hirakawa M, Tanaka C, Yamakawa H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1776
- [11] Cho Y R, Lee J H, Song Y H, Kang S Y, Hwang C S, Jung M Y, Kim D H, Lee S K, Uhm H S, Cho K I 2001 *Mate. Sci. Engi. B* **79** 128
- [12] Liao Q L, Zhang Y, Huang Y H, Qi J J, Gao Z J, Xia L S, Zhang H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 151504
- [13] Read M E, Schwarz W G, Kremer M J, Lennhoff J D, Carnahan D L, Kempa K, Ren Z F 2001 *Proceeding the 2001 Particle Accelerator Conference*, Chicago, June 18–22, 2001, p1026
- [14] Shiffler D, Zhou O, Bower C, LaCour M, Golby K 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 2152
- [15] Korenev S 2002 *Beams 2002: 14th International Conference on High-power Particle Beams*, Albuquerque June 23–26, 2002, p385
- [16] Zhang H 2010 *MS Thesis* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [张篁 2010 硕士学位论文(绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [17] Shen Y, Zhang H, Liu X G, Xia L S, Yang A M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 080702 (in Chinese) [谌怡, 张篁, 刘星光, 夏连胜, 杨安民 2011 物理学报 **60** 080702]
- [18] Shen Y, Xia L S, Zhang H, Liu X G, Liao Q L 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 775 (in Chinese) [谌怡、夏连胜、张篁、刘星光、廖庆亮 2011 强激光与粒子束 **23** 775]
- [19] Li L M 2004 *MS Thesis* (Changsha: National University of Defence Technology) (in Chinese) [李立民 2004 硕士学位论文(长沙: 国防科技大学)]

# Outgassing property of carbon nanotube cathode with intense pulsed emission\*

Shen Yi<sup>†</sup> Zhang Huang Xia Lian-Sheng Liu Xing-Guang Yang An-Min

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

(Received 31 May 2011; revised manuscript received 16 August 2011)

## Abstract

In order to study the properties of the carbon nanotube(CNT) cathode with intense pulsed emission, the outgassing property of cathode is investigated on the 2MeV linear induction accelerator(LIA) injector. Results show that the cathode has a capability of desorbing gases from the CNT cathode under pulsed high voltage. The outgassing plays an important role in the formation of the cathode plasma. The amounts of outgassing for the several experiments are estimated to be 0.08–1.12Pa·L, the corresponding ratios between outgassing amount and electron number are roughly calculated to be in a range of 254–203atoms/e<sup>-</sup> by numerical integral of pressure, showing that the cathode plasma is weakly ionized. The relationship between diode voltage, emission current density, outgassing amount, and the outgassing molecule number per electron are analyzed.

**Keywords:** carbon nanotube cathode, intense pulsed emission, outgassing property, linear induction accelerator

**PACS:** 29.25.Bx, 61.48.+c, 07.30.Dz, 29.20.Ej

---

\* Project supported by the Foundation of State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials of USTB, China (Grant No.20082D-10).

† E-mail: shenygo@163.com