

文章编号: 1001- 4322(2001)03- 0360- 05

# 12M eV 直线感应加速器二极管优化设计研究

禹海军<sup>1</sup>, 石金水<sup>1</sup>, 李 勤<sup>1</sup>, 祝大军<sup>2</sup>, 何国荣<sup>1</sup>, 马 冰<sup>1</sup>, 王景生<sup>1</sup>, 王丽萍<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2 电子科技大学, 四川 成都 610053)

**摘 要:** 用MAGIC程序对设计的多种12M eV 直线感应加速器的二极管结构进行模拟计算, 得出了二极管阴极表面电场强度分布, 并根据实验结果, 得到了结构最佳设计的二极管模型; 随后利用扫描电镜方法对不同天鹅绒的结构进行了分析与发射性能实验研究, 最后得到优化后的二极管产生的电子束束流参数为: 发射束流  $I_e = 8.50\text{kA}$ , 传输束流  $I_s = 3.0\text{kA}$ , 打靶束流  $I_0 = 2.30\text{kA}$ 。

**关键词:** 直线感应加速器; 二极管; 优化设计; 天鹅绒; 束流  
**中图分类号:** TL 503.3 **文献标识码:** A

强流直线感应加速器(LIA)能够产生高能量的、数kA的高亮度电子束,被广泛地应用于自由电子激光、高功率微波、粒子束聚变等多种研究<sup>[1~3]</sup>。中国工程物理研究院流体物理研究所建造的12MeV LIA曾被应用于上述研究,取得了一系列的成果。随着研究内容的不断加深与扩展,需要进一步提高12MeV LIA整机的性能,这就要求对LIA的注入器、脉冲功率系统、束输运系统等进行改进提高。注入器为LIA提供初始电子束源,要提高12MeV LIA整机的性能,首先需要提高注入器所产生电子束流的品质;电子束流来自于注入器的二极管,它包括含有天鹅绒发射体的阴极和带钨网的阳极。阴极发射体对天鹅绒和阳极钨网以及二极管阴阳极结构设计都对所产生的束流品质有较大影响<sup>[4~8]</sup>。

对于强流、相对论性电子束流的性能优劣主要表现在电子束亮度,提高束亮度的途径包括提高电子束束流大小、减小初始发射度。本文采用通过减小电子束初始发射度来提高电子束的初始束亮度。电子束初始束亮度与阴极面发射体上电场强度分布的均匀性有直接关系,发射面场强分布越均匀,初始电子束发射度就越小,因而初始束亮度就会越高。同时不同的天鹅绒由于材料质地、组成等不同,而导致所产生的电子束品质会有差别。我们首先对不同二极管结构位形的阴极发射体的场强分布进行模拟计算,得到阴极发射面场强相对均匀而发射电场强度适中的二极管模型,通过对这些模型的实验研究,得到一个实验结果最佳的二极管结构;在此基础上,对几种天鹅绒进行扫描电镜分析(SEM)及电子发射性能的实验,最后得到一个有合适天鹅绒阴极与最佳实验结果的二极管及其所产生的电子束束流。

## 1 结构优化设计

### 1.1 理论模拟计算

采用二维空间中模拟等离子体物理过程的有限差分域粒子模拟程序(MAGIC)来计算。模拟空间任一点的电磁场由Maxwell方程组解得

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\mathbf{D}}{t} \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

另外,用完整的洛伦兹力方程可解得相对论带电粒子的轨迹,即

$$\frac{d(m_0 \gamma v)}{dt} = q(E + v \times B) \tag{2}$$

其中  $m_0$  为粒子静止质量;  $q$  为粒子带电量;  $\gamma$  为相对论因子。

我们设计了多种二极管的阴阳极结构, 通过数值模拟计算, 可以得到不同二极管结构中阴极发射面上的电场强度分布。表 1 给出了 10 种模型上阴极发射区域的电场强度的大小及分布, 其中二极管间电压为 1MV, 阴阳极间距为 35mm,  $E_0$  为阴极发射区域中心的场强,  $E$  为阴极发射区域内任一点的场强,  $\Delta = |(E - E_0)/E| \times 100\%$  表示阴极发射区域内场强的相对变化,  $\Delta$  越小, 表示阴极发射面上的场强分布越均匀。M<sub>0</sub> 为二极管阴阳极原始结构模型。

表 1 二极管模型及阴极发射场强分布

Table 1 Diode models and their emitted field distributions on cathode surfaces

	M <sub>0</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub> (M <sub>1</sub> <sup>#</sup> )	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub> (M <sub>2</sub> <sup>#</sup> )	M <sub>7</sub>	M <sub>8</sub>	M <sub>9</sub> (M <sub>3</sub> <sup>#</sup> )
$E_0/(\text{MV} \cdot \text{m}^{-1})$	28.30	29.96	27.76	27.82	29.09	28.90	28.12	28.39	28.46	28.39
$\Delta$	26.5	23.0	14.2	13.7	6.5	5.8	4.2	3.5	2.8	0.05

上述计算过程中没有直接对发射电子束流的发射度进行计算, 真实的发射度值需要通过测量来测定, 由于测量发射度时需要把 12M eV LIA 注入器部分断开, 这将影响 12M eV LIA 机的其它研究工作, 因而我们暂时不能测定初始发射度值。

考虑到表 1 中的计算结果以及 12M eV LIA 的现有情况, 我们确定并设计了如图 1 的 3 种二极管模型(平面结构)。

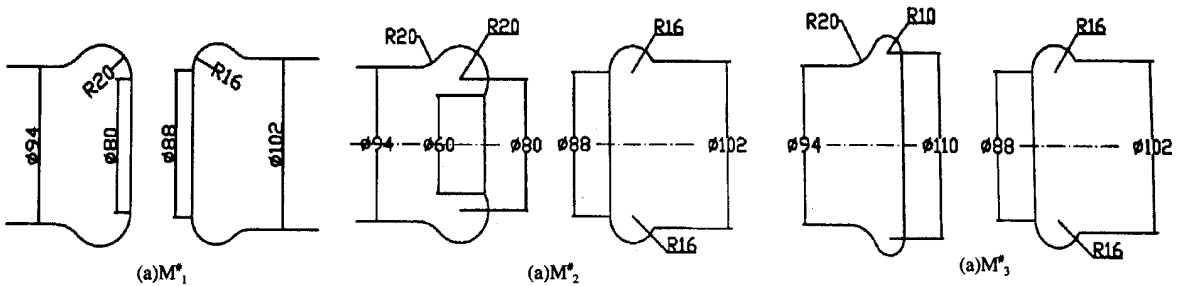


Fig 1 2D configuration of three diode models

图 1 3 种二极管模型的平面结构

### 1.2 实验结果

我们先后用 3 种二极管模型代替原先的二极管结构, 在 12M eV LIA 上进行了一系列实验, 得到了在这 3 种二极管模型下的实验结果。采用电阻环法<sup>[9-12]</sup>来模拟测量每次实验的电子束流参数, 这些参数包括初始电子束发射电流  $I_c$ 、12M eV LIA 第 8 个组元后的电子束流  $I_8$  (所能够测到的离发射面最近的传输束流)、电子与重金属靶相互作用的打靶束流  $I_0$ 、与  $I_0$  对应的电子电荷量  $q$  以及总电压  $V$ 。表 2 给出了这 3 种新二极管结构模型与原始模型在多次重复实验后得到的电子束流平均值。同时, 亦得到了 M<sub>1</sub><sup>#</sup>、M<sub>2</sub><sup>#</sup>、M<sub>3</sub><sup>#</sup> 结构下多次实验的发射束流  $I_c$ 、束流  $I_8$  和打靶束流  $I_0$  的叠加波形如图 2~ 图 4 (图中, (a)、(b)、(c) 图分别对应于 M<sub>1</sub><sup>#</sup>、M<sub>2</sub><sup>#</sup>、M<sub>3</sub><sup>#</sup>)。

表 2 不同二极管结构下的束流参数

Table 2 Current parameters for different diode models

	$I_c/\text{kA}$	$I_8/\text{kA}$	$I_0/\text{kA}$	$V/\text{MV}$	$q/\mu\text{C}$
M <sub>0</sub>	8.40	2.54	2.00	11.44	168
M <sub>1</sub> <sup>#</sup>	8.53	2.90	2.22	11.47	170
M <sub>2</sub> <sup>#</sup>	7.81	2.38	2.00	11.51	156
M <sub>3</sub> <sup>#</sup>	8.95	3.06	2.32	11.49	182

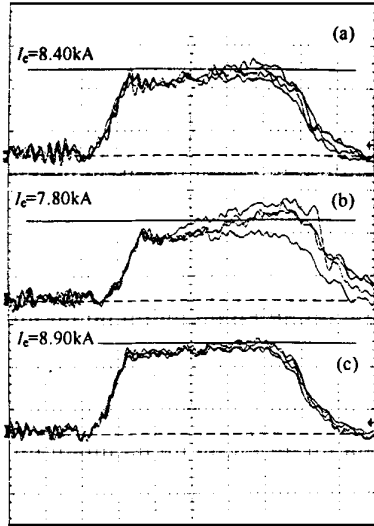


Fig 2 Em itted current  $I_e$  (20ns/div)  
图 2 发射束流  $I_e$  (20ns/div)

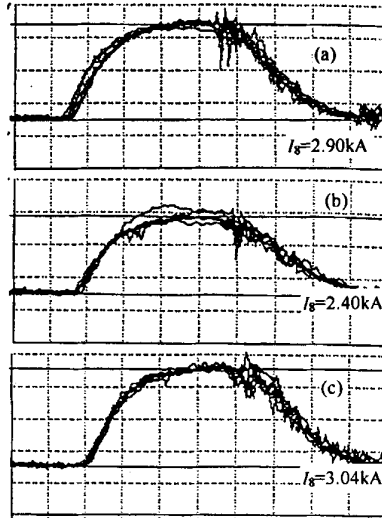


Fig 3 Current  $I_s$  (25ns/div)  
图 3 束流  $I_s$  (25ns/div)

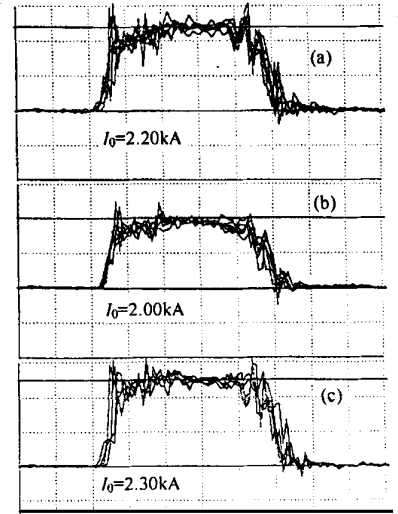


Fig 4 Targeted current  $I_0$  (20ns/div)  
图 4 打靶束流  $I_0$  (20ns/div)

## 2 天鹅绒分析与实验

### 2.1 扫描电镜分析

从市场上随机买来的天鹅绒分析样品共分为 5 种, 在表面进行平整化处理后, 依次被编号为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>。其中 1<sup>#</sup> 为麻绒, 纯棉底, 化纤绒毛; 2<sup>#</sup> 为锦地绒, 属化纤类; 3<sup>#</sup> 为真丝绒, 全部为真丝; 4<sup>#</sup> 为平绒, 全部由纯棉组成; 5<sup>#</sup> 不详。从外形来看, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 样品绒毛较长, 而 4<sup>#</sup> 绒毛较短。所采用的仪器为从乌克兰引进的型号为 REMMA -102 的扫描电镜。

由于平绒不导电, 上电镜观察前需要进行导电处理, 方法是用导电胶将平绒布样品粘贴在金属基片上, 然后进行真空喷碳处理; 电镜观察时在 600 倍下进行拍照, 分别得到 1<sup>#</sup> 至 5<sup>#</sup> 天鹅绒的绒毛表面形状, 如图 5。从图中可以看到: 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 样品表面绒毛分散, 4<sup>#</sup> 样品的形貌与其它样品不同, 绒毛呈扁平扭曲状, 而 2<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 样品形貌较相似, 排列较为均匀, 相对而言较密。

### 2.2 发射实验研究

分别把 5 种天鹅绒样品应用于上述经过优化的平面阴极模型 M<sub>3</sub><sup>#</sup> 上, 在电压为 1MV、阴阳极间距为 35mm 的二极管上进行实验。表 3 给出了这 5 种天鹅绒样品在上述条件下连续 5 次实验所得到的各部分束流参数的平均值。

表 3 不同天鹅绒实验的束流参数比较

Table 3 Current parameters of different kinds of velvet

	$I_e$ /kA	$I_s$ /kA	$I_0$ /kA	$q/\mu C$	$V/MV$
1 <sup>#</sup>	9.70	2.90	2.25	172	11.66
2 <sup>#</sup>	9.62	2.72	2.20	165	11.35
3 <sup>#</sup>	8.52	3.02	2.30	180	11.40
4 <sup>#</sup>	9.48	3.00	2.27	176	11.63
5 <sup>#</sup>	9.50	3.02	2.30	186	11.64

## 3 结 论

(1) 在相同(如二极管间电压、电子束能量等相同)条件下, 二极管模型 M<sub>3</sub><sup>#</sup> 能够产生最大束流( $I_s$  和  $I_0$ )和最佳品质的电子束, 而且实验结果重复性最好。

(2) 理论计算和实验结果相符合。在表 1 的理论计算中模型 M<sub>3</sub><sup>#</sup> 的阴极发射体上电场强度分布最均

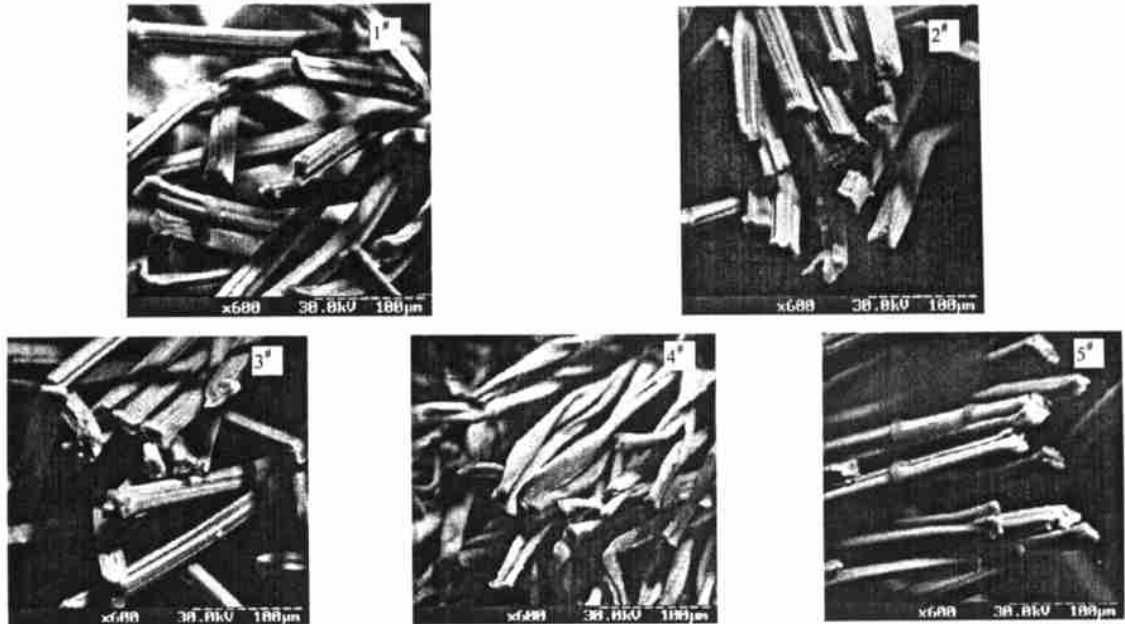


Fig. 5 SEM analyses of five kinds of velvet

图5 5种天鹅绒样品的扫描电镜分析

匀,其初始发射度就最小;在束流相同的情况下,束亮度最高;在经过同等距离与相同条件的传输后电子束流的打靶电流与积分电荷量就应最大,与表2中的结果相符。

(3)通过对5种天鹅绒样品在12MV LIA的1MV二极管上的发射实验及结果(表3)来看,这5种样品在同样的发射条件下,所得到的发射束流的差别较小。对天鹅绒样品的扫描电镜分析可以得到:即不论表面纤毛的形状与长短如何,在高电压(1MV)作用下,天鹅绒表面瞬间被完全碳化,发射情况已经没有太大区别,而且由于阴极形状是被优化设计的,其表面的场强最大差别仅为0.05%,因而不同种类与结构的天鹅绒所产生的电子束流的流强与品质相近。综上所述,对于天鹅绒阴极发射体来说,在阴极形状被优化设计的条件下,不同天鹅绒的发射性能没有特别明显的差别,可以不考虑其表面纤毛的长度与形状,只需要对它的表面进行平整化处理。

(4)利用二极管模型M<sub>3</sub><sup>#</sup>与天鹅绒样品3<sup>#</sup>,在二极管间电压1MV、阴阳极间距35mm的条件下,得到的电子束束流参数为:发射束流 $I_e = 8.52\text{kA}$ ,传输束流 $I_s = 3.0\text{kA}$ ,打靶束流 $I_0 = 2.3\text{kA}$ ,都远远超过了现有的束流水平( $I_s = 2.5\text{kA}$ , $I_0 = 2.0\text{kA}$ )。

致谢 感谢12M eV LIA运行组在实验过程中给予的支持与帮助。

## 参考文献:

- [1] Launspach L, Bonnafond C, Mascureau J D, et al Recent results on the DARHT and ARIX 4MV  $\pm$  1%, 3.5kA electron beam injectors[A]. 10<sup>th</sup> IEEE Conf. High Power Particle Beams[C]. USA, 1994, 515-521.
- [2] Michizono S, Tsutsui H, Matsumoto S, et al Electron gun simulation using MAGIC[A]. XX Linac 98[C]. Chicago, 1998, 493-495.
- [3] Burns M J, Carlsten B E, Kwan T J T, et al DARHT accelerators update and plans for initial operation[A]. Particle Accelerator Conference[C]. New York 1999, 617-621.
- [4] Lau Y Y. Effects of cathode surface roughness on the quality of electron beams[J]. *J Appl Phys*, 1987, 61(1): 36-44.
- [5] 禹海军,程念安,陶祖聪.无箔二极管结构设计研究[J].*强激光与粒子束*, 1996, 8(3): 393-399.  
[Yu H J, Cheng N A, Tao Z C. The criterion of configuration design in foilless diode *High power laser and particle beams*, 1996, 8(3): 393-399](in Chinese)
- [6] 张奇,邢达,植田宪一,等.天鹅绒阴极发射性能的实验研究[J].*强激光与粒子束*, 1992, 4(1): 107-113.

- [Zhang Q, Xing D, Ueda Ken-ichi, et al Experiment of velvet cathode emission. *High power laser and particle beams*, 1992, **4**(1): 107-113](in Chinese)
- [7] Hughes T P, High-brightness electron-beam generation and transport[J]. *J Appl Phys*, 1990, **68**: 2562-2568
- [8] 王少恒 天鹅绒阴极发射性能与机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1996  
[Wang S H. Mechanism and performance of velvet cathode emission. Mianyang: CAEP, 1996](in Chinese)
- [9] 戴光森 L I A 脉冲电压、电流、电子束流测试研究[A]. 10M eV 直线感应加速器会议文集[C]. 绵阳: 1994, 180-187.  
[Dai G S. Measurement of L I A pulse voltage, current and electron beam [A]. Proceeding of 10M eV linear induction accelerator. Mianyang: 1994, 180-187. ](in Chinese)
- [10] 禹海军, 石金水 回流离子动力学行为研究[J]. 强激光与粒子束, **13**(2): 237-240  
[Yu H J, Shi J S. Dynamics behavior of backstreaming ions. *High power laser and particle beams*, **13**(2): 237-240](in Chinese)
- [11] 何文龙, 何培艾, 程念安 磁准直器测强流电子束亮度[J]. 强激光与粒子束, 1990, (2): 252-256  
[He W L, He P A, Cheng N A. Brightness measurements of an intense electron beam using a magnetic collimator. *High power laser and particle beams*, **1990**, **2**(2): 252-256](in Chinese)
- [12] 代志勇, 祝大军, 胡声种, 等 2M eV 有箔注入器的束流调试[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(3): 371-374  
[Dai Z Y, Zhu D J, Hu S Z, et al. Beam transport of 2M eV foil injector, *High power laser and particle beams*, 2000, **12**(3): 371-374](in Chinese)

## Optimum design for 12M eV linear induction accelerator diode

YU Hai-jun<sup>1</sup>, SH IJ in-shui<sup>1</sup>, ZHU Da-jun<sup>2</sup>, L I Q in<sup>1</sup>, HE Guo-rong<sup>1</sup>, MA B ing<sup>1</sup>, WANG Jin-sheng<sup>1</sup>, WANG L i-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China;

2 University of Electronics and Technology Science, Chengdu 610053, China)

**Abstract** A series of optimization designs of electron diode in 12M eV linear induction accelerator are studied by using numerical simulation code MAGIC and experiment method in order to improve the electron beam quality. MAGIC code solves the Maxwell equations in the presence of charged particle, electron field distribution on cathode surface which influences electron emission is given, the optimum diode is obtained by comparing the results of experiment in 12M eV linear induction accelerator. The paper also gives SEM analysis and experiment comparison of velvet emission. Finally, emitted current  $I_e = 8.52\text{kA}$ , beam current  $I_s = 3.0\text{kA}$ , targeted current  $I_0 = 2.30\text{kA}$  with optimum diode are obtained.

**Key words** linear induction accelerator; diode; optimization design; velvet; electron current