

《电子管技术》丛书之一

# 电子注与电子枪

《电子管技术》丛书之一

# 电 子 注 与 电 子 枪

(苏) И. В. 阿良莫夫斯基

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 黄 | 高 | 年 | 译 |
| 张 |   | 伦 | 校 |

(内部读物)

《电子管技术》编辑组

## 毛主席语录

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

《关于正确处理人民内部矛盾的问题》

2015/11  
出版说明

《“电子管技术”丛书》的出版，是为了满足本单位广大工人、工程技术人员和技术管理干部对技术资料多方面的需要。它和“电子管技术”杂志在内容上的分工，主要是：“杂志”着重报导微波电子管在理论、设计、工艺、材料、测试等方面的新水平、新动向；而“丛书”则着重系统介绍上述各个方面的基础知识以及常用的技术数据资料。

毛主席说：“办报和办别的事一样，都要认真地办，才能办好，才能有生气。我们的报纸也要靠大家来办，靠全体人民群众来办，靠全党来办，而不能只靠少数人关起门来办。”遵照毛主席这一教导的精神，希望同志们对本“丛书”的出版多提出宝贵意见并给以支持，使之能为我国的社会主义革命和社会主义建设事业做出应有的贡献。

为了兼顾国内同专业兄弟单位和个人的需要，本“丛书”通过北京市中国书店内部代销一部分，仅收工本费，需要者可去公函联系购买。

## 内 容 简 介

本书叙述了强电子注成形（聚焦）的基本问题，研究了在均匀磁场、周期磁场和反转磁场区以及在非均匀磁场过渡区和收集极区的电子注。同时，还研究了用于成形轴对称电子注、带状电子注和管状电子注的电子枪，以及高导、高收敛度电子枪。

书中叙述了静电聚焦与离子聚焦，并引用了在实践中非常重要的纵向磁场系统的图表曲线和计算实例。

本书适用于从事研制和应用速调管、行波管、返波管等这类现代电子器件的工程技术人员阅读，也可供高等院校的师生参考。

Электронные пучки и электронные пушки

[苏] И. В. Алямовский

«Советское радио», Москва, 1966

## 译者序

电子枪和由它成形的强流电子注是超高频电子器件的基本组成部分。

本书对强流电子注成形（聚焦）方面的基本问题作了较为全面的论述。对各种聚焦磁场（均匀磁场、周期磁场、反转磁场以及非均匀磁场过渡区等）中的电子注以及用于成形轴对称电子注、带状电子注、管状电子注的电子枪和高导流系数、大收敛角电子枪都作了详细的讨论，同时还扼要地介绍了静电聚焦、离子聚焦、热初速和收集极等问题。可以认为，本书是一本具有较大实用价值的专著。

有关电子枪和电子注的资料虽然很多，但大多散见于各种期刊杂志中。比较系统、完整地论述这门学科的书籍则是不多的。本书翻译的目的，就是希望能在一定程度上对有关专业的工作人员和高等院校师生有所帮助。

本书出版于1966年，为便于读者了解1966年以后强流电子光学领域内的发展情况，我们根据苏联“文摘杂志”1966年第1期到1973年第9期分类摘译出了有关文献索引，并按文摘发表的次序列于书后。

赵琪、尹忠杰二同志仔细阅读了本书译稿，并提出了许多宝贵意见。廖信贵同志翻译了《补充材料》和《附录》部分。本单位有关技术领导同志对本书的翻译工作作了许多指导，并审阅了部分译稿。还有一些同志对本书的出版给予了关心

和帮助，译者在此一併表示谢意。

由于我们的水平有限，译文中缺点、错误在所难免，希望读者多加批评指正。

本书翻译时参阅了英译本 AD 680309。

## · 作 者 序

本书应当被看成是应用于现代O型超高频器件(速调管、行波管、返波管等)中的强流电子学的入门。

鉴于电子学总的进步,作为它的一个分支的强流电子学在最近10—12年也得到了显著的、且在许多方面属独立的发展。业已积累了属于理论和实验研究方面以及电子注的实际应用方面的大量资料。

本书试图将这些资料加以概括并使之系统化。同时,书中叙述的内容与次序首先是为满足那些从事实际研制或应用上述超高频器件的读者的需要。书中只介绍了静态电子注。与高频场对电子作用相联系的问题只是在必需阐明电子注特性与整个器件参量之间的关系时才予涉及。

为了对本学科有一个初步的、粗浅的了解,可以阅读第二章到第六章。在这几章里阐明了带状电子注与轴对称电子注的傍轴理论基础以及具有平行注与收敛注的皮尔斯型电子枪的理论基础。

第七章到第十三章更全面地介绍了本学科的内容。在这几章里叙述了以下几个内容:磁场的实际分布、高导电子枪(它们都不能用傍轴理论进行计算)、非均匀磁场过渡区电子注的计算、电子热速度影响的估算、电子枪中磁场作用的考虑以及用周期磁场使电子注聚焦。

第十四章到第十九章讨论了管状电子注的成形、静电聚

焦与离子聚焦的基本问题。给出了对成形系统进行综合的概念。叙述了收集极的问题以及关于电子注的某些补充知识。这几章的内容叙述得不象前几章那样详细，有一部分材料是属于综述性的。

在附录中列出了最常用的成形系统工程计算的公式与表格，包括收敛注电子枪与磁控式电子枪。

分章给出的参考资料目录不能认为是全面的，特别是对前几章来说更是如此。

为了避免重复，作者尽量压缩一些在教科书或其它书籍中已为大家普遍熟悉的理论材料，例如，已被详细研究的空间电荷问题和电解槽模拟方法。

同时，作者认为有必要去讨论一些研究得还不充分、有时甚至还有争论、但却富有重大实际意义的问题。属于这方面的问题例如有：管状电子注成形的某些问题、正离子的影响、电子注的稳定性、收集极电子学。

因为本书也是供大学生使用的，故在头几章中相当详细地给出了某些基本关系式的推导，包括少量数字实例，目的是要说明某些量的数量级。有基础的读者在阅读时可以跳过这些地方。

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 译者序 .....                         | 7  |
| 作者序 .....                         | 9  |
| 第一章 超高频器件中的强电子注 .....             | 1  |
| § 1.1 现代超高频器件中的电子注 .....          | 1  |
| § 1.2 某些术语 电子注的基本类型 电子注成型系统 ..... | 6  |
| § 1.3 主要简化假定 .....                | 10 |
| § 1.4 初始方程 .....                  | 12 |
| 第二章 在空间电荷力作用下电子注的扩散 .....         | 16 |
| § 2.1 带状电子注的外形 .....              | 16 |
| § 2.2 轴对称电子注的外形 .....             | 22 |
| § 2.3 电位下垂 关于某些假定的讨论 .....        | 29 |
| 第三章 在阴极为任意程度屏蔽情况下                 |    |
| 均匀磁场中的带状电子注 .....                 | 32 |
| § 3.1 边界电子的轨迹方程及其求解 .....         | 32 |
| § 3.2 电子注的平衡厚度                    |    |
| 布里渊带状注的特殊情况 .....                 | 37 |
| § 3.3 初始条件的影响 电子注的脉动 .....        | 42 |
| 第四章 阴极为任意程度屏蔽时                    |    |
| 均匀磁场中的轴对称电子注 .....                | 47 |
| § 4.1 布虚定理 电子的角向运动 .....          | 47 |
| § 4.2 考虑空间电荷时的边缘电子轨迹方程            |    |
| 在均匀磁场情况下轨迹方程的近似解 .....            | 51 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| § 4.3 有恒定半径的电子注 特殊情况      |     |
| 轴对称布里渊电子注                 | 55  |
| § 4.4 初始条件的影响 电子注的脉动      | 60  |
| § 4.5 关于实现布里渊电子注条件的一些说明   | 64  |
| 第五章 平行注皮尔斯电子枪             | 66  |
| § 5.1 皮尔斯电子枪              | 66  |
| § 5.2 平板二极管及其中的电位分布       |     |
| 电极形状的计算                   | 68  |
| § 5.3 实际结构中的电极形状          | 73  |
| § 5.4 和强发散透镜作用相同的阳极孔      | 75  |
| § 5.5 有磁场时的电子枪 产生脉动的机理    | 78  |
| § 5.6 电子枪和聚焦磁场的计算         | 81  |
| 第六章 球型和圆柱型收敛注皮尔斯电子枪       | 84  |
| § 6.1 收敛注电子枪的优点           | 84  |
| § 6.2 成形轴对称收敛注的球型电子枪      | 85  |
| § 6.3 阳极透镜的发散作用           |     |
| 阳极后面空间的电子注外形              | 93  |
| § 6.4 成形收敛带状注的圆柱型电子枪      | 100 |
| 第七章 实际成形系统的磁场配置           | 106 |
| § 7.1 连续螺旋线包和分段螺旋线包的磁场    | 106 |
| § 7.2 电子枪和收集极的磁屏蔽 在具有磁屏蔽的 |     |
| 系统中的B-曲线和磁力线的走向           | 110 |
| § 7.3 永久磁铁聚焦系统的磁场         | 117 |
| 第八章 电子枪和聚焦系统规则部分之间的非      |     |
| 均匀磁场区(过渡区)中的电子注           | 120 |
| § 8.1 电子注与磁场的«匹配»问题及其解决途径 | 120 |
| § 8.2 数值计算结果              | 124 |

|        |                              |     |
|--------|------------------------------|-----|
| § 8.3  | 计算过渡区电子注的简化方法                |     |
|        | 成形系统的工程计算方法 .....            | 133 |
| 第九章    | 周期磁场中的电子注 .....              | 137 |
| § 9.1  | 重量方面的得益 周期磁聚焦系统(МПФС)        |     |
|        | 的结构和场分布的描述 .....             | 137 |
| § 9.2  | 周期磁场中的轴对称电子注[9.2—9.7]* ..... | 140 |
| § 9.3  | 周期磁场聚焦电子注的计算                 |     |
|        | 非均匀性的影响 过渡区 .....            | 153 |
| § 9.4  | 某些实际结构 当用波导输入能量时 МПФС        |     |
|        | 的«断裂» МПФС的缺点 .....          | 158 |
| 第十章    | 电子的初始热速度对电子注成形的影响 .....      | 165 |
| § 10.1 | 平板二极管中具有初始热速度的               |     |
|        | 电子运动的物理图象 .....              | 165 |
| § 10.2 | 平行注电子枪中电流密度的再分布 .....        | 169 |
| § 10.3 | 把由平行注电子枪所得结果                 |     |
|        | 推广到圆柱型和球型电子枪的情况 .....        | 177 |
| § 10.4 | 理论与实验的一致性 讨论 .....           | 182 |
| 第十一章   | 包含部分磁屏蔽电子枪的成形系统 .....        | 186 |
| § 11.1 | 妨碍获得层流电子注的因素                 |     |
|        | 在大于布里渊值的磁场中的电子注 .....        | 186 |
| § 11.2 | 电子枪中的磁场 磁通量之间的相互关系 .....     | 189 |
| § 11.3 | 阴极部分磁屏蔽时的平衡电子注               |     |
|        | 最佳磁场 电子的角向运动 .....           | 194 |
| § 11.4 | 部分磁屏蔽电子枪成形的电子注的脉动 .....      | 199 |
| § 11.5 | 阴极上有磁场的系统的计算 .....           | 208 |
| § 11.6 | 讨论 部分磁屏蔽电子枪的优缺点 .....        | 209 |
| 第十二章   | 高导流系数收敛注电子枪 .....            | 216 |

|        |                           |     |
|--------|---------------------------|-----|
| § 12.1 | 高导流系数时收敛注电子枪              |     |
|        | 成形的特点和理论的局限性 .....        | 216 |
| § 12.2 | 阳极孔扩大引起的导流系数的下降           |     |
|        | 导流系数的修正 电极形状              |     |
|        | 计算电子枪的谬勒方法 .....          | 217 |
| § 12.3 | 阳极透镜的象差 改变阴极的形状——         |     |
|        | 降低象差的手段 .....             | 224 |
| § 12.4 | 高导流系数电子枪电极的实验选择方法         |     |
|        | 关于模拟方法的几点说明 .....         | 227 |
| 第十三章   | 实际电子注的主要特性 .....          | 234 |
| § 13.1 | 电子注测量的方法 分析器 .....        | 235 |
| § 13.2 | 无磁场时收敛电子枪成形的电子注的结构        |     |
|        | 电子注的变粗 真空度的影响 象差 .....    | 240 |
| § 13.3 | 磁场中电子注的结构与外形 脉动           |     |
|        | 非层流性 .....                | 247 |
| § 13.4 | 理论与实验的比较 讨论 .....         | 253 |
| 第十四章   | 高导流系数管状电子注的成形 .....       | 258 |
| § 14.1 | 管状电子注成形的物理特点              |     |
|        | 管状电子注引入磁场的条件 .....        | 259 |
| § 14.2 | 管状电子注系统中电位的径向的分布 .....    | 264 |
| § 14.3 | 空间电荷平衡注 电子注的脉动 .....      | 267 |
| § 14.4 | 成形管状电子注的有环形阴极的电子枪 .....   | 272 |
| § 14.5 | 磁控式电子枪 工作原理和装置            |     |
|        | 轨迹的近似计算 .....             | 276 |
| § 14.6 | 磁控式电子枪电极形状的计算 .....       | 284 |
| § 14.7 | 磁控式电子枪工作的实验数据 .....       | 292 |
| § 14.8 | 关于管状电子注和带状电子注稳定性的说明 ..... | 295 |
| 第十五章   | 电子注的静电聚焦 .....            | 298 |

|        |                                                          |     |
|--------|----------------------------------------------------------|-----|
| § 15.1 | 静电聚焦系统的主要优缺点 .....                                       | 298 |
| § 15.2 | 离心静电聚焦 .....                                             | 300 |
| § 15.3 | 周期静电聚焦 .....                                             | 306 |
| § 15.4 | 另外一些静电聚焦的方法 .....                                        | 317 |
| 第十六章   | 电子注中的离子 离子聚焦 .....                                       | 321 |
| § 16.1 | 电子注中的正离子 .....                                           | 321 |
| § 16.2 | 离子的积累和平衡 .....                                           | 328 |
| § 16.3 | 离子聚焦及其特点的物理解释 .....                                      | 334 |
| § 16.4 | 离子聚焦时电子注的几何参量 .....                                      | 339 |
| 第十七章   | 电子收集极 .....                                              | 345 |
| § 17.1 | 收集极的热状态 .....                                            | 346 |
| § 17.2 | 在收集极内的静态电子轨迹 .....                                       | 348 |
| § 17.3 | 在收集极内的动态电子轨迹 .....                                       | 355 |
| § 17.4 | 收集极的二次发射 能量回收问题 .....                                    | 358 |
| 第十八章   | 成形系统的综合方法和某些理论问题 .....                                   | 364 |
| § 18.1 | 电子注成形系统的综合方法和分析方法 .....                                  | 364 |
| § 18.2 | B. T. 阿夫恰罗夫成形理论的<br>基本原理和公式 .....                        | 367 |
| § 18.3 | B. T. 阿夫恰罗夫关于在傍轴近似条件下<br>内命题的求解及成形理论<br>外命题求解的可能途径 ..... | 377 |
| § 18.4 | 具有曲线轨迹的电子注 .....                                         | 379 |
| § 18.5 | 电子注的层流性和稳定性问题<br>关于聚焦刚度的概念 .....                         | 380 |
| 第十九章   | 关于电子注某些问题的补充资料 .....                                     | 383 |
| § 19.1 | 电子注的反转磁场聚焦 .....                                         | 383 |
| § 19.2 | 栅极调制 .....                                               | 389 |
| 补充材料   | 聚焦螺旋线包 磁性材料的一些特性 .....                                   | 394 |

|        |                                        |     |
|--------|----------------------------------------|-----|
| § Ⅱ 1  | 计算螺旋线包的一些要点 .....                      | 394 |
| § Ⅱ 2  | 螺旋线包实际结构的特点 绕组的冷却<br>薄铝片制作的轻螺旋线包 ..... | 398 |
| § Ⅱ 3  | 磁屏用的软磁材料 屏蔽的估算<br>电磁铁 永磁材料 .....       | 401 |
| 附录     | .....                                  | 408 |
| 附录 1   | 计算电子注和电子枪的基本量和基本关系式 .....              | 408 |
| 附录 2   | 计算球型电子枪和<br>轴对称电子注的某些函数表值 .....        | 415 |
| 附录 3   | 轴对称电子注和收敛注电子枪的计算 .....                 | 417 |
| 附录 4   | 具有锥形阴极的磁控型电子枪的计算 .....                 | 421 |
| 文献索引   | .....                                  | 427 |
| 补充文献索引 | .....                                  | 452 |

# 第一章 超高频器件中的强电子注

## § 1.1. 现代超高频器件中的电子注

要建立复杂的现代无线电工程系统,没有大量象速调管、行波管、返波管这类用于振荡和放大的超高频电子器件,是不可能的。在这些器件中,最重要的组成部份之一就是在与电磁场相互作用过程中将电源能量转变成高频振荡能量的强电子注。

在这一节里,我们来研究诸如电子注的导流系数、强度与功率,以及器件的谐振腔或慢波系统与其中电子注外形的相互关系这样一些基本特性。电子注的一个重要特性便是导流系数。导流系数定义为电子注电流  $I$  与加速电压  $U$  的 $3/2$ 次方两者之比:

$$P = \frac{I}{U^{3/2}}$$

导流系数是电子注强度的量度。在电视显象管一类电子束器件中采用了低强度的电子束,其导流系数通常远远小于  $10^{-9}$  安/伏 $^{3/2}$ 。在这些电子注中,空间电荷力对电子运动没有重大影响。因此可以忽略空间电荷的作用。而在超高频器件中通常利用了强度大得多的电子注,其中电子间的相互排斥力对电子运动有重大影响,故不能忽略空间电荷的作用。换句话说,在强电子注中,空间电荷的作用是很大的。计算

表明，导流系数大于  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  安/伏<sup>3/2</sup> 的电子注就应该认为是强电子注。

由于导流系数的数值很小，故常常使用另一个更为方便的数量——微导流系数  $P_\mu$ 。

$P_\mu$  由下式确定

$$P = P_\mu \cdot 10^{-6}$$

许多作者都曾经研究过空间电荷的作用。这些研究的主要结果在文献[1.1~1.5, 1.11]中作了阐述。

电子注的功率正比于加速电压和电流。用  $W$  表示电子注功率时便可以写出

$$W = UI = PU^{5/2}$$

从上式中可以看出，在导流系数不变时，功率随着工作电压的增大而极为迅速地提高。例如，当电压增大一个数量级时，功率将提高 300 多倍。

但是，在所有结合有慢波系统或谐振系统性质的器件中，功率的提高与其依靠增大电压，还不如依靠增大电子注电流。这是因为工作电压愈高，器件的绝缘结构与电源就愈复杂。在大功率和超大功率器件中，以很高的电压（几万伏或更高）工作，将会增加一系列的困难：击穿的危险性增加、高压试验设备庞大而复杂、必需保护工作人员不受强 X 射线辐射的损害等。

在给定电子注功率的条件下，降低工作电压不仅使设备的复杂程度大大降低，而且由于高频系统作用段的缩短，通常还会使器件的体积缩小。在行波管中，随着导流系数的提高，增益和效率也可能提高。在速调管中，导流系数的提高将使通频带展宽。这些都可以用来说明现代器件中增大导流