

微波管电子学

W. J. 克萊恩 著

邵燮麟 等 譯

上海科学技术出版社

73459
259

微波管电子学

W. J. 克莱恩 著
邵燮麟 等 译
孟 侃 等 校

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书以数理方法,对目前常用微波管的电子学基础,作有系統的定性分析和定量分析。本书还介紹微波管作为电路元件的諧振电路和延迟綫的性质。最后一章介紹电子注的产生和聚焦。

本书可作大学教学参考用书,亦可供工程技术和科研人員参考。

本书由邵燮麟、邵义麟和王桐翻譯,并經孟侃和邵燮麟校閱。

微 波 管 电 子 学

ELECTRONICS OF MICROWAVE TUBES

原 著 者 W. J. Kleen

原出版者 Academic Press
Inc., 1958 年第一版

譯 者 邵 燮 麟 等

校 者 孟 侃 等

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

大东集成联合印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印張 11 6/32 字数 283,000

1962 年 10 月第 1 版 1962 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—4,500

統一书号: 13119 · 478

定 价: (十四) 1.85 元

原 著 者 序

最近二十年中,微波管电子学的发展极其迅速和深入。在此领域中工作的物理学家和工程师的数目不断增加。目前这门课程已在大多数的工科学院和大学中讲授。在此领域中的原始文献的范围已如此广泛,以致需要有一本系统地介绍微波管基础的书。

显然,这本书不可能考虑到全部细节,这样所涉及的范围将太广泛,因此必须作某些选择。我们决定把目前是微波管的基础、而且将来也似乎继续如此的那些内容收罗在内。作者觉得特别重要的是,应该对目前通信中所用的那些微波管工作的效应,给予定性的和定量的解释。本书内容适合具有大学毕业程度的数理水平的读者。作者希望在微波管研究所的物理学家和工程师,也将觉得本书是一种有用的工具书,它能迅速查核日常工作中可能遇到的问题。

在微波领域内,将电子管与其电路分开是困难的,为此已经增加几章,以讨论电路中的电子管(第十四~十六章)及作为电子管元件的谐振电路和延迟线的特性(第十七~十八章)。这几章对于非微波管专业的大学生、物理学家和工程师应该也是有兴趣的。微波管最重要的课题之一是电子注的产生和聚焦,这将在最后一章介绍。

书中主要问题的数理论述,可毋须查阅各章后的参考文献。这些文献的挑选首先是为了历史上的关系,换句话说,援引的论文在这方面系首先发表,或对该问题叙述得最清楚。其次,帮助读者钻研本书范围之外问题的参考文献也包括在内。

1952年本书首先以德文版出版,它是以1950~1952年间作者在马德里及斯德哥尔摩的讲课教材为基础的。几年后,当建议出版英文版时,作者觉得须加以全面修改,补充微波电子学领域中

不断的发展,因此英文版的内容有了很大的扩充和更动。P. A. Lindsay 博士, A. Reddish 和 C. R. Russell 先生除了翻译本书外,还校正了德文版中的不少错误,并提出许多有关表达方式的建议,特别是改变了符号制,以适合英美的用法。作者愿借此机会向英译者们的贡献致谢。

作者于此愿再次向所有鼓励和帮助早期德文版工作的人们表示谢意,其中特别值得提出的是:法国的 O. Döhler 博士和 R. Warnecke 博士,以及德国的 J. Labus 博士、K. Pöschl 博士和 W. Ruppel 博士。

W. 克 萊 恩

1958年3月于德国慕尼黑

单位和符号制

本书采用合理化 MKS 单位制，并采取下列公认的符号惯例：

$$\mathbf{E} = -\text{grad } V,$$

$$I = dq/dt;$$

式中，对于一个电子，其电荷 q 是 $-e$ ； e 是一正电量。我們可以用图中的简单二极管来说明这些惯例，图中电位差 $V_p - V_c$ 是正值，因此 $\mathbf{E} = -\text{grad } V$ 是负值。对于从阴极流至阳极的电子电流， I 是负值。电子当然是往“上坡”跑的。这是大家都熟悉的，这里只是要强调一下，我们是遵照习惯用法而已。

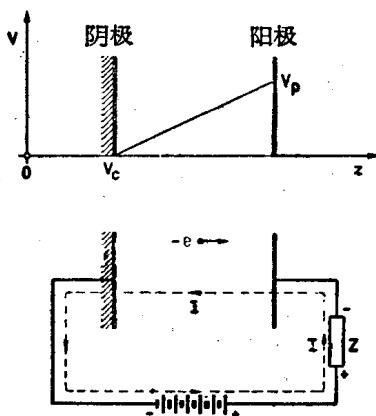
电子管或电子注常须以一等效阻抗来表示。当这个阻抗吸取功率时，它须是一正的实数，才有物理意义，这正是图中所示的情况。这就必须有下列定义：

$$Z = -V/I,$$

或对于电子管的交流阻抗，

$$Z = -\tilde{V}/\tilde{I};$$

式中， V 是电位差。但是在电路理论中，一般习惯都是



$$Z = +V/I \quad \text{或} \quad Z = +\tilde{V}/\tilde{I}.$$

主要符号和标记

(a) 普适常数

$$\epsilon_0 = 8.8485 \cdot 10^{-12} \text{ 法/米}$$

$$\mu_0 = 1.2576 \cdot 10^{-8} \text{ 亨/米}$$

$$e = 1.6020 \cdot 10^{-19} \text{ 库仑}$$

$$m = 9.1066 \cdot 10^{-31} \text{ 千克}$$

$$\eta = e/m = 1.759 \cdot 10^{11} \text{ 库仑/千克}$$

$$(2\eta)^{1/2} = (2e/m)^{1/2} = 5.932 \cdot 10^5 [\text{库仑}]^{1/2} / [\text{千克}]^{1/2}$$

$$k = 1.3803 \cdot 10^{-23} \text{ 焦耳/}^\circ\text{K}$$

$$kT_0 = 4.0029 \cdot 10^{-21} \text{ 焦耳}$$

$$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2} = 2.99776 \cdot 10^8 \text{ 米/秒}$$

$$Z_W = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2} = 377 \text{ 欧}$$

真空中的介电常数(电容率)

真空中的磁导率

电子电荷量

电子质量

玻耳兹曼常数

实际电阻器在室温 $T_0 = 290^\circ\text{K}$

的噪声能量

真空中的光速

自由空间的波阻抗

(b) 数学标记

$\mathbf{a}, \mathbf{A}$

$\tilde{a}, \tilde{A}$ (或 a, A)

$\hat{a}, \hat{A}$

$\bar{a}, \bar{A}$

$\text{Re}(\tilde{A}), \text{Re}(\hat{A})$

$\text{Im}(\tilde{A}), \text{Im}(\hat{A})$

$\tilde{A}^*, \tilde{A}^*, \hat{A}^*$

∇

x, y, z

r, θ, z

t

$j = \sqrt{-1}$

$\simeq$

$\leq$

矢量

交变量(复数)

振幅(复数)

不随时间变化的量

$\tilde{A}$ 或 $\hat{A}$ 的实数部分

$\tilde{A}$ 或 $\hat{A}$ 的虚数部分

$A, \tilde{A}$ 或 $\hat{A}$ 的共轭复数

劈形算符

直角坐标(笛卡儿坐标)

圆柱坐标

时间

单位虚数

近似于

小于或等于

$\lesssim$

∞

A

$J_n(x)$

$Y_n(x)$

$I_n(x)$

$K_n(x)$

小于或近似于

正比于

截面或表面积

第一类第 n 阶贝塞尔函数

第二类第 n 阶贝塞尔函数

第一类第 n 阶变形贝塞尔函数

第二类第 n 阶变形贝塞尔函数

(c) 稳定的和交变的分量

$$a = \bar{a} + \tilde{a} = \bar{a} + \hat{a} \exp(j\omega t)$$

$$v = \bar{v} + \tilde{v} = \bar{v} + \hat{v} \exp(j\omega t)$$

$$z = \bar{z} + \tilde{z} = \bar{z} + \hat{z} \exp(j\omega t)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \tilde{\rho} = \bar{\rho} + \hat{\rho} \exp(j\omega t)$$

$$i = \bar{i} + \tilde{i} = \bar{i} + \hat{i} \exp(j\omega t)$$

$$I = \bar{I} + \tilde{I} = \bar{I} + \hat{I} \exp(j\omega t)$$

$$E = \bar{E} + \tilde{E} = \bar{E} + \hat{E} \exp(j\omega t)$$

$$V = \bar{V} + \tilde{V} = \bar{V} + \hat{V} \exp(j\omega t)$$

$$H = \bar{H} + \tilde{H} = \bar{H} + \hat{H} \exp(j\omega t)$$

$$\tau = \bar{\tau} + \tilde{\tau} = \bar{\tau} + \hat{\tau} \exp(j\omega t)$$

$$\Theta = \omega \tau = \bar{\Theta} + \tilde{\Theta} = \bar{\Theta} + \hat{\Theta} \exp(j\omega t)$$

加速度

速度

距离

空间电荷密度

电流密度

电流

电场强度

电压, 电位差

磁场强度

过渡时间

过渡角

(d) 电流、电压和场

I_c

I_{ind}

$$\tilde{I}_d = A \epsilon_0 \partial \tilde{E} / \partial t$$

$\tilde{I}_{\text{cap}}$

$$I_{\text{tot}} = I_{\text{ind}} + \tilde{I}_{\text{cap}} = I_c + \tilde{I}_d$$

I_s

I_{sc}

I_{RMS}

V, ϕ

$V_{\text{oc}}, \mathcal{E}$

运流电流

感应电流

位移电流

电容充电电流

总电流

饱和电流

短路电流

均方根电流

电压, 电位

开路电压, 电动势

V_{RMS}

E

ϵ_r

$D = \epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon E$

H

μ_r

$B = \mu_r \mu_0 H = \mu H$

(e) 电子量

$\bar{v}$

$\omega_p = (-e\bar{\rho}/m\epsilon_0)^{1/2}$

λ_p

$\omega_r = (e/m)B$

$\omega_L = (e/2m)B$

t_0

$\phi_0 = \omega t_0$

r_{p0}

r_p

g_m

$\dot{\theta}_e = \omega_e$

均方根电压

电场强度

相对介电常数

电位移

磁场强度

相对磁导率

磁感应强度

漂移速度

等离子区频率

等离子区波长

回旋加速频率

拉莫尔频率

电子进场时间

进入相位

电子管静态板阻 ($\omega=0$)

电子管板极阻抗

电子管静态跨导

电子角速度

(f) 能量、力、功率、效率

W

w

F

P

$P_0 = \overline{IV}$

P_{real}

P_{react}

$P_{a,g}$

$P_{a,n}$

P_e

能量

能量密度

力

功率

直流功率

有功功率

无功功率

发生器有效功率

发生器的噪声功率

电子供应的功率

P_{cct}

P_{out}

P_{in}

$\eta = P_{\text{out}}/P_0$

$\eta_e = P_e/P_0$

$\eta_c = P_{\text{out}}/P_e$

$\mathcal{G}$

电路元件消耗功率

输出(有用)功率

输入(调制)功率

总效率

电子效率

电路效率

增益(功率放大)

(g) 电路、网络和线的特性量

$Y = G + jB$

$Z = R + jX$

Z_0

Z_W

C

L

$Y_0 = (C/L)^{1/2}$

G_{res}

R_{res}

$K = \alpha/\beta^2$

ρ

$R_s = (\omega\mu\rho/2)^{1/2}$

$= 34(\rho\mu_r/\lambda_0)^{1/2}$

$S = (2\rho/\omega\mu)^{1/2}$

$= 29 \cdot 10^{-3}(\rho\lambda_0/\mu_r)^{1/2}$

$\hat{R}'$

$Y_{11} = \tilde{I}_{\text{in}}/\tilde{V}_{\text{in}}, \text{ 当 } \tilde{V}_{\text{out}} = 0 \text{ 时}$

$Y_{22} = \tilde{I}_{\text{out}}/\tilde{V}_{\text{out}}, \text{ 当 } \tilde{V}_{\text{in}} = 0 \text{ 时}$

$Y_{21} = \tilde{I}_{\text{out}}/\tilde{V}_{\text{in}}, \text{ 当 } \tilde{V}_{\text{out}} = 0 \text{ 时}$

$Y_{12} = \tilde{I}_{\text{in}}/\tilde{V}_{\text{out}}, \text{ 当 } \tilde{V}_{\text{in}} = 0 \text{ 时}$

M_T

M_{cct}

导纳

阻抗

特性阻抗

自由空间的波阻抗

电容

电感

特性导纳

谐振点的电导

谐振点的电阻

耦合电阻(欧)

电阻率(欧·米)

趋肤效应决定的面电阻

欧(λ 以米及 ρ 以欧·米为单位)

趋肤深度

米(λ 以米及 ρ 以欧·米为单位)

传输线每米的电阻(欧/米)

电子管输入导纳(输出短路)

电子管输出导纳(输入短路)

电子管转换导纳

电子管反馈导纳

电子管品质因数(增益带宽乘积)

电路带宽的度量

$$M_N = M_T M_{\text{cct}}$$

$$\lambda_0$$

$$\lambda_g$$

$$\lambda_{\text{res}}$$

$$f$$

$$f_{\text{res}} = \omega_{\text{res}} / 2\pi$$

$$\Delta f$$

$$B$$

$$B_0$$

$$\omega$$

$$\phi, \psi$$

$$Q$$

$$Q_0$$

$$Q_e$$

$$Q_L$$

$$\gamma = j\Gamma = \alpha - j\beta$$

$$\alpha$$

$$\beta = \omega / v_p = 2\pi c / v_p \lambda_0 = 2\pi / \lambda_g$$

$$v_p$$

$$v_g$$

$$k = \omega / c$$

$$\beta_e = \omega / v$$

$$\theta_p$$

$$\omega_0, \omega_x$$

$$S = |V_{\text{max}}| / |V_{\text{min}}|$$

$$\rho$$

(h) 起伏量(第十五及十六章)

i

电子管网络的品质因数 (增益带宽乘积)

自由空间内的波长

波导或传输线中的波长

谐振点的波长

频率

谐振频率

频宽

带宽

增益较最大值下降 3 分贝时的带宽

角频率

相角

电路品质因数

谐振电路的 Q 值

加载谐振电路的“外界 Q 值”

加载谐振电路的“加载 Q 值”

波的传播常数

传播常数实数部分

传播常数虚数部分 (相位常数)

相速度

群速度

自由空间相位常数

速度 v 的电子流的“相位常数”

在圆形结构中波的角相速度

有滤波特性的线中的通带截止频率

电压驻波比, VSWR

反射系数

起伏电流

$\hat{i}$

起伏电流的振幅

$\hat{i}^2 = i_{RMS}^2$

起伏电流的均方根值

i_{sc}

短路起伏电流

v

起伏电压或电动势

$\overline{v^2} = v_{RMS}^2$

起伏电压的均方根值

v

速度起伏

w_x

起伏量 x 的功率谱

$w_{x,y}$

交叉功率谱

$\gamma = \gamma_1 + j\gamma_2$

相关系数

$P_{a,u}$

发生器的噪声功率

T_0

室温 (290°K)

T_c

阴极温度 (°K)

T_n

噪声温度 (°K)

T_e

电子温度 (°K)

T_A

天线噪声温度 (°K)

Γ

噪声平滑因数 (噪声电流有效值
与饱和二极管噪声电流有效值
之比)

F

接收机中一级的噪声数字

$F_0 = F - 1$

电子管噪声数字 (附加噪声数字)

$(S/N)_{HF}$

接收机高频部分的信号噪声比

$(S/N)_M$

接收机检波器后的信号噪声比

目 录

原著者序

单位和符号制

第一章 微波电子学的范围1

1.1 定义1

1.2 微波管和微波加速器1

1.3 微波管和微波加速器在处理上的一些基本区别3

第二章 电子在静态场中的运动6

2.1 过渡角6

2.2 运动方程式6

2.3 在无空间电荷的静电场中的过渡时间7

2.4 空间电荷场中的过渡时间10

2.5 在正交电场和磁场中的电子运动13

2.5.1 平行平板系统13

2.5.2 圆柱系统16

2.5.3 “截止”特性18

2.5.4 Busch 定理18

第三章 微波管中的电流20

3.1 概述20

3.2 感应电流21

3.3 运流电流24

3.4 总电流25

3.5 三极管中电流的定性查驗26

3.6 Llewellyn-Peterson 方程式29

3.6.1 具有初速的二极管29

3.6.2 计算方法30

第四章 电子流和周期性电场之间的功率交换39

4.1 一般原理39

4.2	周期性驻波场的功率交换	40
4.3	周期性前进波场的功率交换	41
4.4	結論	45
第五章	驻波场中的速度调制	48
5.1	綫性调制	48
5.2	非綫性调制	53
第六章	在无射频场区域中电子聚束的彈道处理	56
6.1	概述	56
6.2	正弦调制; 无場漂移空間	56
6.3	正弦性速度调制; 具有均匀減速場的漂移空間	62
6.4	非正弦性速度调制; 无場漂移空間	63
第七章	利用驻波场从电子注中汲取功率	65
7.1	概述	65
7.2	綫性情形	65
7.3	非正弦性运流电流	68
第八章	二极管和栅控管	71
8.1	概述	71
8.2	飽和二极管	71
8.3	空間电荷限制二极管	73
8.4	空間电荷限制二极管交流导納的討論	75
8.5	所得公式应用于栅控管	79
8.6	总发射阻尼	82
第九章	相位选择	88
9.1	概述	88
9.2	利用相位选择的器件	89
第十章	无静态横向場时行波对电子流的调制	92
10.1	問題	92
10.2	基本計算	93
10.3	一般討論	96
10.4	单电子注和延迟綫	96
10.5	无延迟綫的双电子注	101

10.6	在非零电导率介质中的电子注	103
10.7	电子注的场论基础	105
10.8	具有速度分布的电子注中的空间电荷波	110
第十一章	自由空间电荷波	112
11.1	概述	112
11.2	电子流作为传输线	113
11.3	在无静态场区域中的空间电荷波	116
11.4	在 $\bar{v} = Kz^{\mu}$ 的静态加速场中的空间电荷波	119
11.5	空间电荷限制二极管中的空间电荷波	121
11.6	无静态场的轴对称系统中的空间电荷波	122
11.7	电子注的变换	125
11.8	自由空间电荷波的功率	129
第十二章	正交电磁场中电子注和行波的相互作用	133
12.1	定义	133
12.2	行波磁控管	134
12.2.1	定性介绍	134
12.2.2	电子弹道	136
12.2.3	交变电流和传播常数	139
12.3	电子波磁控管和阻壁磁控管	144
第十三章	微波管分类	147
13.1	空间电荷控制管	147
13.2	过渡时间管. 概要	147
13.3	漂移空间管	149
13.4	增长波管	152
13.5	行波管和行波磁控管之间的特性差别	155
13.6	返波振荡管	156
第十四章	微波管实际应用	160
14.1	概要	160
14.2	用于微波中继系统的微波管	160
14.3	雷达中的微波管	166
14.4	用于超高频电视广播的微波管	168

14.5	用于超視距傳輸的微波管	170
14.6	用于綫性加速器的微波管	171
14.7	圓波导通信系統中所应用的微波管	171
第十五章 电子管作为电路元件		174
15.1	发生器的有效功率	174
15.2	功率增益	174
15.3	效率	175
15.4	有效噪声功率和噪声温度	175
15.5	噪声数字	177
15.6	帶寬,群过渡時間,相位失真	179
15.7	放大器当作四端网络	185
15.8	增益-帶寬乘积:电子管的品质因数	189
15.9	微波傳輸系統中的发射机功率、帶寬、噪声数字和射程	191
15.10	Rieke 图	194
15.11	振蕩器的滞后現象	195
15.12	晶体混頻器	197
第十六章 噪声		201
16.1	基本概念	201
16.2	飽和二极管的噪声	205
16.3	总发射噪声	206
16.4	小过渡角空間电荷限制二极管中的噪声	207
16.5	栅控管中的噪声	208
16.5.1	原理	208
16.5.2	栅控管的几个特征噪声量	210
16.5.3	栅控管的噪声数字	214
16.5.4	噪声四端网络的变换	216
16.6	电子注中的起伏	217
16.7	气体放电管作为噪声发生器	222
第十七章 微波諧振回路		227
17.1	一般性质	227
17.2	品质因数和回路效率	230

17.3 谐振时品质因数和导纳的测量	231
17.4 同轴线谐振器	232
17.4.1 谐振频率	232
17.4.2 谐振时的回路损耗	235
17.4.3 带宽	237
17.5 电容性加载空腔谐振器	240
第十八章 延迟线	244
18.1 一般性质	244
18.2 延迟线的分类	246
18.3 延迟线和普通波导之间的差别	247
18.4 基本延迟线方程式	250
18.5 均匀延迟线	252
18.5.1 螺旋套	253
18.5.2 平行板延迟线	259
18.5.3 Karp 电路	260
18.6 不均匀延迟线	264
18.6.1 各种形状的不均匀延迟线	264
18.6.2 等效电路	265
18.6.3 在周期性结构线中波的传播	267
18.6.4 分析周期性延迟线的一般方法	273
18.6.5 平面周期性延迟线的分析	274
18.6.6 皱纹状圆波导的分析	278
18.6.7 作为周期性延迟线的螺旋带	281
18.7 闭环周期性延迟线	285
18.7.1 一般性质	285
18.7.2 闭环延迟线的分析	287
18.7.3 行波磁控管的色散曲线和模式	290
第十九章 电子注和电子枪	295
19.1 引论	295
19.2 电子运动	295
19.3 在无场空间中的电子注	297