

毫米波系统

〔美〕K.J.巴顿 J.C.威尔茨 编

方再根 刁育才 译

国防工业出版社



毫米波系统

〔美〕 K.J. 巴顿 J.C. 威尔茨 编

方再根 刁育才 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是《红外与毫米波》丛书的第四卷，论述毫米波系统。全书共分七章，第一章全面介绍了毫米波技术的发展现状和毫米波的应用范围，内容十分广泛；第二、三、七章分别详细讨论了毫米波雷达、导弹制导和近毫米波成像系统的工作原理、设计方法以及一些实例；第四、五、六章分别叙述了毫米波辐射源、介质波导中的毫米波和亚毫米波的传输原理。

本书可供从事微波、雷达、导弹制导、遥感、通信、电子对抗、射电天文学等专业的科技工作者参考，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

INFRARED AND MILLIMETER WAVES
VOLUME 4 MILLIMETER SYSTEMS
KENNETH J. BUTTON JAMES C. WILTSE
ACADEMIC PRESS 1981

*

毫米波系统

*

〔美〕K. J. 巴顿 J. C. 威尔茨 编
方再根 刁育才 译

*

国防工业出版社出版、发行

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 $1/32$ 印张 $11\frac{3}{4}$ 309千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

ISBN 7-118-00266-6/TN49 定价：7.20元

译 序

本书译自国际红外与毫米波年会 1981 年编辑出版的《红外与毫米波》丛书的第四卷——《毫米波系统》。

毫米波技术方面的研究与普通微波几乎具有同样悠久的历史,但其应用却远不如微波那样广泛。限制它发展的主要原因是其大气传播损耗较大,而功率源等关键器件的发展又很缓慢。但是,近年来毫米波技术有了重大突破,从而迅速地进入了比较成熟的阶段。目前,频率低于 140GHz 的毫米波系统所需元器件已经完备,且已达批量生产水平。另一方面,微波、红外、激光等军用系统在发展中又遇到一些严重的障碍,迫切需要利用毫米波技术的潜在优点。这样,毫米波技术就应运而生,成为当今最活跃的技术领域之一。现在,毫米波技术已进入系统应用和向更高频段发展的阶段,它在雷达、通信、导弹制导、电子对抗、辐射测量学、遥感、射电天文学、波谱学等方面的应用前景令人瞩目。

本书比较系统地详细讨论了雷达、导弹制导和近毫米波成像等几种主要的毫米波系统的工作原理、设计方法和一些实例,并以适当篇幅叙述了辐射源和介质波导集成电路等毫米波器件,反映出目前国际先进水平。译者希望本书的翻译出版会对国内从事有关毫米波技术工作的人们有所裨益。

原书中的一些印刷错误已作修正。由于我们水平有限,译本中的错误和不妥之处在所难免,请读者批评指正。

原 书 序

在这套《红外与毫米波》丛书中,本书首先讨论毫米波系统,之后几卷还将论及这个题目。最近的技术进展使毫米波频段产品商业化,从而保证了论述毫米波的书籍会受到人们一定的重视。在国际红外和毫米波年会(Annual International Conference on Infrared and Millimeter Waves)的日程中,关于毫米波的内容比较多。

本书有关雷达、导弹制导、成象的几章直接确定了其内容的性质,但是它们发展的动力却是系统从微波向更短的毫米波的扩展。在论述毫米波辐射源和介质波导中传输原理的三章中说明了这种推动力。

第一章是毫米波的介绍和概述,其内容十分广泛。它是本书作者之一在1979~1980期间,为(美国)电气与电子工程师学会(IEEE)微波理论与技术专业学会(Microwave Theory and Techniques Society)的年度讲学而写的。本书其余各章只讨论了第一章叙及的一部分论题,即详细讨论了雷达、导弹制导、成象和介质波导中的传输等,而更多讨论元件新技术的几章和论述毫米波通信一章都被省略了。本丛书计划另外再写书讨论毫米波及其应用。

我们在本《丛书》前几卷中已经感谢了各位作者和支持他们研究工作的各社会团体。我们对(美国)电气与电子工程师学会微波理论与技术专业学会支持国际红外和毫米波年会也表示了谢意。本丛书的一些材料就来自这些会议。现在,我们对学术出版社(Academic Press)的全体工作人员表示感谢,他们解决了出版本丛书的一些最困难的问题。

目 录

第一章 毫米波介绍与概述 1

J. C. 威尔茨

一、背景	1
二、新技术	5
(一) 源	6
(二) 混频器	9
(三) 元器件	10
(四) 天线	11
三、系统应用	12
(一) 导弹制导	12
(二) 雷达	13
(三) 辐射测量学、遥感和射电天文学	14
(四) 通信	16
(五) 电子对抗	18
(六) 生物学应用	20
参考文献	20

第二章 毫米波雷达 25

E. K. 里蒂 G. W. 尤厄尔

一、毫米波雷达原理	25
(一) 毫米波雷达特性	26
(二) 雷达距离方程	32
(三) 元件和技术	35
(四) 毫米波雷达的应用	36
二、传播效应	37
(一) 衰减和反射	37
(二) 多径效应	44
三、杂波特性	46
(一) 陆地杂波	46
(二) 海洋杂波	55

四、技术基础	60
(一) 接收机	60
(二) 发射机	63
(三) 天线	71
(四) 无源元件	77
五、毫米波雷达设计举例	80
六、毫米波雷达的应用	84
(一) 搜索和目标截获	84
(二) 测试系统与测量方法	86
(三) 制导和导引头	91
(四) 火控和跟踪	93
参考文献	96
第三章 导弹制导	100
C. R. 西肖尔	
一、引言	100
(一) 末制导问题	100
(二) 毫米波的优点	101
二、传播和目标特性	103
(一) 大气和传播的影响	104
(二) 目标和背景特性	107
三、距离方程	118
(一) 被动扫描	119
(二) 主动扫描	123
四、毫米波导引头设计	128
(一) 导弹制导方案	129
(二) 导引头搜索和跟踪	132
(三) 波形与处理	141
(四) 导引头硬件	152
五、对抗	156
参考文献	157
第四章 毫米波辐射源——行波管和固态源	159
N. B. 克雷默	
一、引言	159
二、行波管	159
(一) 耦合腔电路	162

(二) 一般设计考虑	165
(三) 电子注	168
(四) 电子枪	169
(五) 设计方法	171
(六) 实际考虑和特性	173
三、固态源	177
(一) 崩越管工作原理	177
(二) 崩越管的设计考虑	183
(三) 二极管的封装	191
(四) 二极管的特性	195
(五) 功率放大器和注入锁相振荡器	202
(六) 崩越二极管的可靠性	205
四、结束语	207
参考文献	208
第五章 介质波导型毫米波集成电路	210
T. 伊藤	
一、引言	210
二、用于集成电路的介质波导	211
(一) 介质波导的型式	211
(二) 毫米波介质波导和光学介质波导的比较	215
三、介质波导的传播特性	217
(一) 介质波导中的相位常数及场分布	218
(二) 衰减特性	240
(三) 理论分析的一些最新进展	248
四、由介质波导构成的无源元件	255
(一) 定向耦合器	256
(二) 谐振器和滤波器	259
(三) 非互易器件	264
五、有源元件	266
(一) 移相器	267
(二) 振荡器	270
(三) 混频器和自激混频器	273
六、用于介质波导型毫米波集成电路的天线	275
(一) 表面波天线和阵	276
(二) 漏波天线	278
七、分系统	283

八、结束语	285
参考文献	285
第六章 用介质波导作亚毫米波导波实验	288
M. 辻 H. 茂泽 K. 澆山	
一、引言	288
二、平板介质波导	290
(一) 分析	290
(二) 实验	293
三、脊状介质波导	311
(一) 分析	312
(二) 实验	316
四、圆柱介质波导	324
(一) 分析	325
(二) 实验	331
五、结束语	337
附录 6-I	338
附录 6-II	339
附录 6-III	340
参考文献	341
第七章 主动近毫米波系统的成象工作模式	342
G. A. 戈登 R. L. 哈特曼 P. W. 克鲁斯	
一、引言	342
二、近毫米波的传播	345
三、系统设计的一些考虑	348
(一) 搜索空域和速率	348
(二) 斑点平均	351
(三) 系统灵敏度	354
四、系统限制和波长的综合考虑	355
五、图象质量的一些考虑	359
(一) 对分辨力的要求	359
(二) 提高分辨力	359
(三) 图象斑点	362
(四) 图象闪耀	365
参考文献	367

第一章 毫米波介绍与概述

一、背 景

近年来,毫米波技术在研制发射机、接收机、器件和部件等方面都已取得重大进展。目前,在通信、雷达、辐射测量学、遥感、导弹制导、射电天文学和光谱学等系统应用方面,毫米波技术也有相当大的进展。本章对毫米波技术的发展状况作一小结,并列出大量有关参考文献,以后各章再进一步详细论述一些新技术和新系统。

毫米波频段通常指30~300GHz频率范围,相应波长为1cm~1mm,但是(美国)电气与电子工程师学会(IEEE,1976)在所颁布的标准中将40~300GHz作为毫米波的标称频率范围,而把27~40GHz叫做K_u频段。别的流行术语还有近毫米波和亚毫米波。前者频率范围约为100GHz(有时取90GHz)到1000GHz;后者约为150~3000GHz(3THz)。图1-1说明上述术语和其他一些术语,表1-1列出各种用字母表示的频段的名称。从光学观点来看,“超远红外”频段从远红外一直降到150GHz频率。

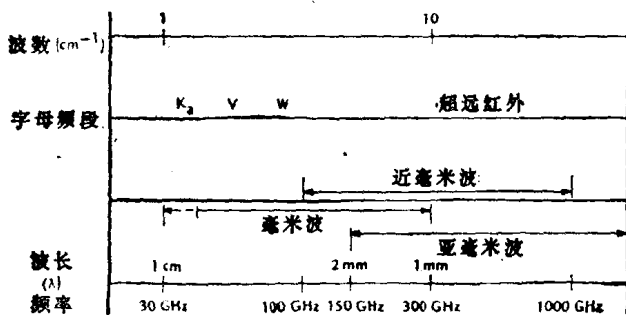


图1-1 毫米波和其他频率范围术语

表1-1 频段名称

微波与雷达 用法		参议长联席会议		国际电信联盟 国内瓦		电子工业协会 陆海军 标准波导	
英国 用法	美国 用法	频段名称	频段名称	频段名称	米制名称	矩形波导尺寸的 参差序列(无脊)	
	W频段 56~100GHz	M 60~100GHz	11频段			90~140GHz	WR 10 75~110GHz
V频段 50~75GHz	V频段 46~56	L 40~60	EHF 30~300GHz			WR 12 RG 99 60~90	WR 15 RG 98 50~75
O频段 40~70	Q频段 36~46					WR 19	WR 22 RG 97 33~50
Q频段 27~40	 K _a 33~36	K 20~40	10频段 SHF 3~30			WR 28 RG 96 26.5~40	WR 34 22~33
K频段 18~27	K频段				厘米波	WR 42 RG 53 18~26.5	WR 51 15~22

毫米波频段的一个特性是，与微波频段相比，对于给定的可用天线尺寸（孔径），其波束宽度较窄、增益较高；反过来说，为了得到指定的增益或窄波束，可采用较小的天线。这一点，在诸如导弹末制导导引头和机载探测器等许多应用中很重要。对导弹引头来说，窄波束可以减少来自目标周围地面“杂波区域”的雷达或辐射计的不需要的回波。

一般来说，大气传播效应支配着许多有关应用的考虑。这一点就是对于在大气层外的卫星通信也同样正确，因为人们必须选择那些大气层不传播的频率以防止地面接收机探测到卫星间的通信。要想阻止信号在一定的距离上产生“过辐射”，地面系统同样可工作在大气吸收很强的频率上以得到一定的隐蔽效果。海平面和海拔4km处的大气衰减典型值如图1-2所示。值得注意的是，由于大气成分中的氧气和水蒸汽造成几个大气吸收的峰值，以及几个叫做窗口的大气吸收极小的区域。还有一个特点是窗口极小值随频率增高而单调增加。雨、云、雾会产生附加的衰减（和后

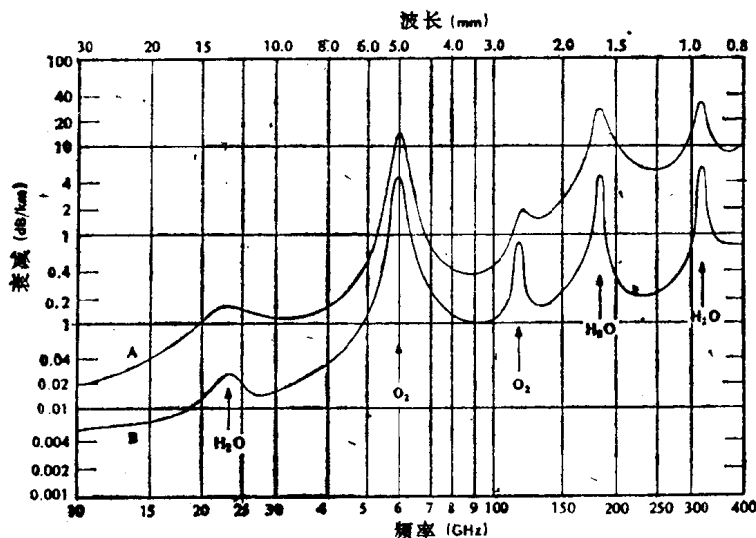


图1-2 毫米波的平均大气吸收值

A, 海平面, $T = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 760\text{ mm}$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 7.5\text{ g/m}^3$. B, 4 km,
 $T = 0^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1\text{ g/m}^3$.

向散射), 但是除非能见度很低 (例如 100m, 或更低), 一般雾引起的损耗较小 (见图 1-3)。云的衰减率可能不是太小 (取决于其液体水容量), 但是由于其范围有限, 所以总的衰减量通常较小。因为冰的介电常数比液体水小得多, 所以卷冰云引起的衰减很小, 可以忽略。大气效应产生的衰减和后向散射数值, 对于 100GHz 以下的频率, 已有精确数据 [陈 (Chen), 1975; 桑德尔 (Sander), 1975; 戴尔 (Dyer) 和柯里 (Currie), 1978; 理查德 (Richard) 和坎默尔 (Kammerer), 1975; 珀辛格尔 (Persinger) 等, 1980]。现在的任务是要获得大气对 100GHz 以上频率影响的比较精确的数据 [库尔帕 (Kulpa) 和布朗 (Brown), 1979; 科巴雅西 (Kobayashi), 1980]。人们特别感兴趣的是大气对 35、94、140 和 220GHz 附近衰减极小值的影响。

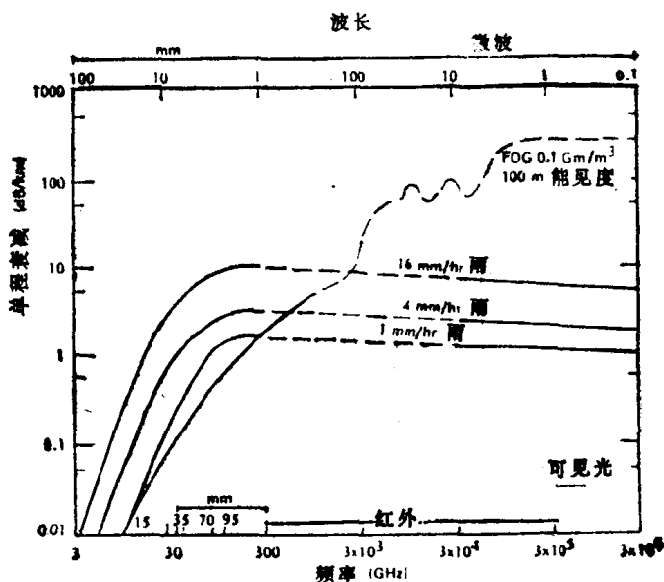


图1-3 雨和雾的影响

由于晴朗大气中局部温度和湿度是时变的, 它所引起的大气扰动效应产生振幅起伏和到达角变化, 对这些问题正在仔细进行研究 [安德烈耶夫等 (Andreyev *et al*), 1977; 麦克米伦等 (McMi-

llan *et al.*), 1979 a 和 b]。在晴朗大气中, 近地面的中等长度的传播路径 (比方说一或几公里) 引起的振幅起伏可达几个分贝。振幅起伏的速率是缓慢的 (频谱宽度约为每秒几周或几十周)。因此, 在一些应用中可用自动增益控制加以补偿。然而, 到达角的影响可能没有那么容易补偿, 因为一些毫米波系统有时可能设计为具有很好的角分辨力, 而大气到达角的起伏在某些情况下可造成一些误差。在晴朗大气中, 一到几公里的传播路径引起的到达角的峰值-峰值间的起伏可多达 0.5 mrad。

对烟和(或)灰尘对毫米波传播的影响也进行了测量。其中一个例子是(美国)陆军大气科学实验室于 1978 年 9 月在白沙 (White Sands) 试验基地所做的一个试验 (DIRT-I)。该试验对穿过灰尘和油烟云的 94 和 140 GHz 的毫米波以及红外线的传播进行了测量 [林德伯格] (Lindberg), 1979]。

在亚利桑那州哈瓦苏 (Havas) 湖城附近进行的另一个试验中, 测量了几种波长的毫米波通过由 720 吨烈性炸药爆炸产生的一片巨大的灰尘云的传播和反射情况 [马丁 (Martin), 1979]。这些试验结果现在可为系统工程师的设计工作提供具体数据。在其他一些测试方案中, 对陆地和海洋的反射特性和辐射特征 (即杂波) 进行了测量, 对车辆和其他一些目标的这些特性也在几个窗口频率处进行了测量 [特里比茨 (Trehits *et al.*), 1978; 库尔帕和布朗, 1979]。

二、新 技 术

过去几年, 在毫米波段研究及应用方面的强大复苏归因于新技术的出现, 探测器和通信线路的新的要求, 以及在穿透烟、雾、霾、尘埃和其它有害环境方面毫米波系统优于光学及红外系统。已改进的技术包括较好的源 (诸如崩越管、耿氏振荡器、回旋管、分布作用振荡器、以及磁控管等), 它们具有较高的功率输出和 (或) 可在更高的频率上工作, 并且在某些情况下比早期的设计具有更长的寿命。同时也研制了很多低噪声混频器。在近 100

GHz 的频率上所提供的噪声温度低于 500 K (非致冷) 或 100 K (致冷)。元件的研制也取得了进步, 特别是在集成电路、镜像线、鳍线波导, 以及准光学技术这些领域内。然而元器件的改进仍存在着余地, 尤其是在把铁氧体和其它非线性器件的工作频率扩展到 100 GHz 以上, 以及在降低大部分元件中的损耗方面。由于种种原因, 在从 35 到 100 GHz 的频率范围内(在 140 GHz 有几个特例) 已见到有大量的系统研究, 而在 100 GHz 以上的频率范围内(以及进入亚毫米波段), 研究工作正集中在各种元件和技术上面。

(一) 源

在源的方面, 无论是固态的还是真空管类型的都可以得到, 并可以按各种方式使用(在本卷第四章中详细叙述)。对于低功率应用(峰值功率几瓦, 平均功率几十毫瓦)的固态崩越管已进行了广泛的研究, 现在可工作在近 300 GHz。耿氏振荡器可以用到 100 GHz, 速调管可以用到 200 GHz, 返波管可以用到 1000 GHz 以上。在中功率电子管中, 磁控管的寿命已经得到改善, 可以用到 95 GHz; 分布作用振荡器(EIO)已经出现, 并已在高达 280 GHz 的频率上投入使用。回旋管和有关的器件在非常高的功率方面获得了突破, 在效率大于 30% 的情况下已经得到兆瓦级的峰值功率, 并在效率接近 50% 的情况下获得了几百千瓦的连续波功率。回旋管已在核聚变研究中得到了应用, 而且毫无疑问地会很快在通信和雷达中得到应用。在特定的毫米波和亚毫米波频率上, 也可以使用光泵激光器产生较大的功率, 但是其效率和脉冲重复频率较低[加拉格尔(Gallagher)等, 1977; 德坦普尔(DeTemple), 1979]。

毫米波应用的增长当然可以部分地归因于改进的固态源的存在。尽管这些源提供的功率相当低, 但与各种真空管如磁控管、分布作用振荡器以及速调管相比, 它们的总尺寸较小, 并且要求较低的电压和激励功率。在过去几年里, 固态源最明显的改进是有了更高的输出, 以及可以在更高的频率上工作。另外有一些改

进是比较精细但对于系统是非常重要的，其中包括稳定频率源或锁相源、注入锁定崩越放大器，以及倍频耿氏振荡器的研制（顺便提及，对于脉冲分布作用振荡器也进行了频率稳定和锁相的研究）。由于这些改进，使得全固态脉冲压缩以及相参动目标显示（MTI）雷达扩展到 94GHz〔伯纽斯（Bernues）等，1979；西莫纳蒂（Simonutti）等，1980〕。同样，全固态接收机正在扩展到 200GHz。

在从 3~230GHz 以上的频率范围内，可以用崩越振荡器。在近 40GHz 时，其典型的效率为 5%，而在 100GHz 以上时，则低于 1%。单个振荡器的连续波功率输出大约在 500mW (40GHz) 到 10mW (230GHz) 之间，通过合成几个二极管的输出已在 60GHz 得到 1W 以上的功率。在 94GHz 已由单个二极管获得了 13W 的峰值脉冲功率输出，并由四个二极管的功率合成器得到 40W 的功率输出，效率为 6%〔张和埃伯特（Chang and Ebert），1980〕。崩越器件也被用来作为放大器使用〔马（Ma）等，1980〕。与耿氏二极管相比，虽然由于它的雪崩载流子产生机构决定了其固有噪声大些，但可以用锁相或注入锁定的方法加以改进〔久野和冯（Kuno and Fong），1979；米德福德（Midford）和伯尼克（Bernik），1979；冯和久野，1979；冯等，1980〕。关于崩越管技术的非常全面的评论已在本专题论文的第一卷中由久野（1979）给出。

从微波范围到高达 100GHz 的频率可以使用耿氏振荡器。虽然其功率比崩越管低些，但是它具有纯净的频谱，因此耿氏管是非常有用的。作为接收机本地振荡器和实验室信号源，它们得到了最广泛的应用。砷化镓耿氏二极管的效率在 3% (40GHz) 到 1% 以下 (100GHz) 的范围之内。连续波功率输出在 200mW (40GHz) 到 20mW (100GHz) 之内变化。在 100GHz 以上，由于材料性质的影响（砷化镓的“迁移率截止”），其功率输出显著地下降。为了产生更高的功率和效率，以及在 100GHz 以上的频率提供有效的功率，研究工作已经转向磷化铟耿氏二极管〔范

克 (Fank) 等, 1979]。另一方面, 为了在这些较高的频率上获得信号, 可以使用变容管倍频器。市场上买得到的典型的二倍频器, 在 70GHz 输入功率为 45mW, 其效率为 35%。

多年来, 一些常规的真空管源, 如速调管和磁控管也已经逐步得到改进。特别是磁控管, 至少还有二个限制: 最高频率在 100GHz 附近 (峰值功率输出约 1kW), 寿命通常小于 100~200h。这些限制导致使用分布作用振荡器, 其频率覆盖为 30~280GHz (分布作用振荡器, 1975)。由于电子注不是被决定频率的结构所收集, 所以预期其寿命比磁控管大一个数量级。脉冲功率输出约为 5kW (35GHz), 1kW (95GHz) 和 40W (280GHz)。此外, 还有一些连续波管子, 在 K_u 波段输出几百瓦, 在近 100GHz 输出几十瓦, 在 140GHz 输出大于 10W。分布作用放大器 (EIAs) 也在研制之中。

返波振荡器 (BWOs 或 Carcinotron[●]) 现在也在被使用着, 这类管子的频率覆盖已从微波的中段, 通过毫米波段, 扩展到亚毫米波段 [康特罗维奇 (Kantorowicz) 等, 1979; 康特罗维奇 (Kantorowicz) 及帕吕厄 (Paulluel), 1979]。在苏联, 其频率覆盖已经扩展到 1100GHz 以上。这些管子, 功率通常在几十或几百毫瓦的范围之内, 并具有调谐范围宽的特殊优点 (有时覆盖全波导频段), 因此可做为通用信号源使用。

最近回旋管受到了广泛地宣传, 因为它能产生非常高的脉冲或连续波功率。这种管子的研究已经进行了多年, 过去二十年在苏联以及最近几年在美国都特别受到重视 [乔里 (Jory) 等, 1978; 邱 (Chu) 等, 1979; 扎伊采夫 (Zaytsev) 等, 1974]。关于这种管子和有关的相对论性电子注管的详细资料已在本专题论文的第一卷中给出 [赫希菲尔德 (Hirshfield), 1979]。概括地说, 回旋管已在整个毫米波段工作, 可产生数兆瓦的峰值功率或几十到几百千瓦的连续波功率, 通常具有非常好的效率 (>30%) (邱等,

● Carcinotron 是 Thomson-CSF 公司电子管分部制造的返波管的商品名字。