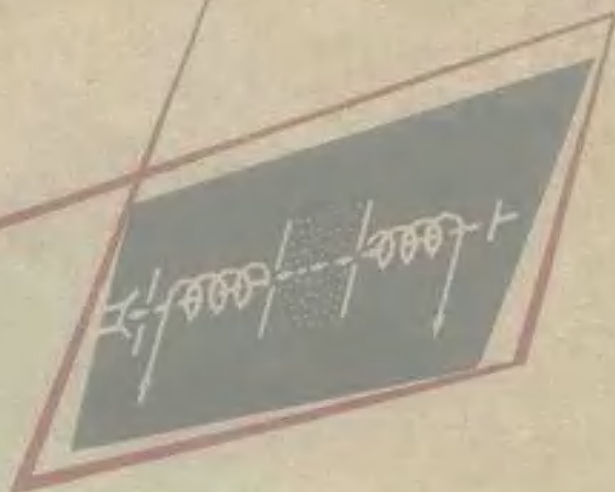




亚毫米波

Н. Р. 盖 凯 尔 著
苏联 В. И. 尤利叶夫

楊在春 王积勤 译

人民邮电出版社



苏联金无电业

И. Р. Геккер, В. И. Юрьев
Субмиллиметровые Волны
Госэнергоиздат 1961

内 容 提 要

这本小册子介绍亚毫米波的产生、传播和接收问题。

目前亚毫米波段掌握得还很少，但这个波段对于无线电技术及其他科学部门的发展却有着重大的意义。

亚 毫 米 波

著 者：苏联 И. Р. 盖凯尔 В. И. 尤利叶夫

译 者：杨 在 春 王 机 勤

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四六条13号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第048号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1963 年 6 月北京第一版

印数 1 24/32 页数 28

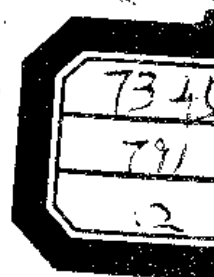
1963 年 6 月北京第一次印刷

印刷字数 41,000 字

印数 1—5,650 册

统一书号：15045·总1342—无353

定价：(10) 0.26 元



緒 言



波长 λ 从0.1毫米到1毫米，即频率从3000千兆赫到300千兆赫（1千兆赫 $=10^3$ 兆赫 $=10^9$ 赫）的电磁波，称为亚毫米波。亚毫米波在低频段上与毫米波毗邻，而在其高频段上紧挨着红外线（热射线）。亚毫米波有时也叫中间波、过渡波、百微米波或超微波。

1895年，著名的俄国科学家П. Н. 列别捷夫在火花激励小型振子（偶极子）时，最先获得了毫米波（ $\lambda=6$ 到3毫米）。以后，在1923年，尼考尔斯和基勒也用火花振荡器得到了 $\lambda=2$ 到4毫米的振荡。另一方面，在1911年，物理学家卢宾斯从石英水银灯获得了 λ 从0.2毫米到0.34毫米的长波红外线辐射。然而长期以来，在无线电波段与红外线辐射之间一直存在着一个空段。只由于苏联物理学家A. A. 格拉果列娃—阿尔卡杰娃在1922—1924年发表的关于制造群粒辐射器的光辉著作，才成功地把以前全部所不知道的波段填补了起来，而获得了波长从50毫米到0.082毫米的电磁振荡。关于亚毫米波在无线电技术中的应用问题，在苏联无线电物理学家С. Я. 图尔雷金的著作中都已经讲过了。

在技术上成功地掌握了米波、分米波、厘米波、一部分毫米波以及红外线辐射之后，现在人们对亚毫米波产生越来越大的兴趣。但是由于在这个波段里没有功率足以实际应用的单色（单频率的）振荡源，就使得亚毫米波波段的研究受到了很大的阻碍。

对亚毫米波发生兴趣，不仅是由于能够获得很宽的无线电通信频带，而且还由于可以制成尺寸适当的天线，以产生强方

向性的电磁波束。亚毫米波的最大缺点是在地面大气中被强烈吸收。但这并不妨碍它用在宇宙空间中進行定向的无线电通信，用于射电天文学和无线电定位。由于苏联宇宙火箭发射的成功，这些都不是遙远未来的事了。

亚毫米波对于使我们增加各种物质结构知識的光譜学，对于超导电現象的研究，对于实现可控热核反应时高浓度气体放电等离子区密度的測量，对于热核反应堆的可能控制，对于生物学及化学等，都有很大的意义。

这本小册子主要是探討制造亚毫米波波段振盪器的各种可能途径，而这些途径在很大程度上，都是在最理想情况下只限于毫米波波段內的一些尝试性的想法。目前很难预料，到底哪种途径是最有发展前途的。现在在这方面，只能做些預測而已。本书还討論有关亚毫米波的传播、接收及其可能的实用范围等問題。

目 录



前言

第一章 亚毫米波产生的特点	1
1. 亚毫米波的产生	1
2. 相干辐射的获得	2
3. 发热体的辐射	6
4. 石英水银灯	6
5. 群粒辐射器	7
第二章 电子倍频器	9
6. 超高频器件所产生的高次谐波	9
7. 场致电子发射特性的利用	11
8. 相对论电子群聚加速器、微波加速器和直线加速器	13
9. 瓦维洛夫——切连柯夫辐射的利用	17
10. 多普勒——别洛鲍斯基效应的利用	20
11. 过渡辐射和制动辐射的利用	22
第三章 等离子区和固体特性的利用	23
12. 等离子区的振荡	23
13. 等离子区中的非线性效应	25
14. 用半导体产生亚毫米波	25
15. 晶体倍频器	26
16. 铁氧体中的非线性效应	28
17. 分子振荡器和分子激光器	29
第四章 亚毫米波的传播	32
18. 亚毫米波在不同介质中的传播	32
19. 亚毫米波的传输方法	34
第五章 亚毫米波的接收和测量	37
20. 亚毫米波的指示	37

4320

11 1268

21. 亚毫米波段內的功率測量.....	40
22. 亚毫米波段內波長的測量.....	41
第六章 亚毫米波的可能应用范围	46
23. 在无线电技术中的应用.....	46
24. 在物理学、化学和生物学中的应用.....	47
結束語	50

0-34/01

第一章 亚毫米波产生的特点

1. 亚毫米波的产生

产生波长 λ 从 0.1 毫米到 1 毫米的电磁振荡的问题，实际上现在还没有解决。在全部的电磁波频谱中（硬性宇宙辐射除外）至今尚未掌握的，事实上只有一个亚毫米波波段了。人们多次试尝把毫米波波段的器件推广到亚毫米波波段去，但是不管现有电子器件（速调管、磁控管、行波管、返波管等）的工作原理是怎样的，它们都随着波长的缩短而出现下列一些缺点：1) 尺寸和高频系统公差都显著减小；2) 高频损耗增大；3) 电子束中的电子与在高频系统中传播的电磁波的场之间的耦合减小了；4) 要求显著增大电子束中电流的密度；5) 高频系统中使稠密电子束通过的困难增加了；6) 效率降低了。

超高频波段电子器件，特别是毫米波波段电子器件的工作是基于电子与高频电磁场的相互作用。电子与高频电磁场的这种相互作用，发生在与电磁能相联系的高频系统的附近。随着波长的缩短，速调管、磁控管及其他振荡器在制造上都是有困难的。例如，对于一般的工作状态，谐振器的尺寸与工作波长约在同一数量级。在 5.5 毫米波长上产生振荡的反射式速调管环形谐振器的尺寸如下：直径为 2.1 毫米，高为 1.25 毫米，电子束通过处的间隙为 0.2 毫米^①。譬如说，在保持相应公差的情况下，制造 $\lambda=0.5$ 毫米（即尺寸减小到 $\frac{1}{10}$ ）的这种谐振器，是不太现实的。

① 参看“国外无线电电子学”，1961，№ 1，24—50 页。

产生必須的电子束电流密度也同样是有困难的。随着频率的增高，电子束与系統中高频场的联系减弱了，因为纵向电场的强度，在离开这个系统的表面的距离增加时，成指数地降低。因此电流密度必須显著增大（与 $\lambda^{\frac{3}{2}}$ 成反比）。后者受到阴极的容許放射密度和电子束聚焦的可能性的限制。

尽管有上面这些困难，目前制成的一些电子器件，都能成功地工作在毫米波波段的长波部分。其中的某些器件，进一步又用到这个波段的短波部分。例如，国外正在制造输出功率达几百毫瓦、波长 $\lambda=4$ 毫米的反射式速調管。設計了在連續状态下输出功率达30瓦的8毫米波波段的腔速調管。波长 $\lambda=6$ 到8毫米的脉冲式磁控管的功率达到几十千瓦，而 $\lambda=3$ 毫米的达到几万瓦。大家都知道，現在制成了 $\lambda=2.6$ 毫米、功率达到3千瓦的磁控管； $\lambda=6$ 毫米、输出功率到几十毫瓦和 $\lambda=1.5$ 毫米、功率在1毫瓦以下的返波管以及 $\lambda=5$ 到6毫米、输出功率达0.5瓦的行波管。

借助磁控管、返波管和反射式速調管（当输出功率和工作寿命都显著减小时）获得1毫米左右的波长在原则上是可能的。但是利用这类器件来产生亚毫米波，实际上就难以实现了。

把电子器件推广到亚毫米波波段的某些成就（以后将要叙及），可由过渡到高压和使电子速度接近光速的方法来保证。这就使得电子因空間电荷力而发生的相斥作用降低，使电子束容易聚焦。此外，利用电子束与比較快的波（即速度接近光速的波）的相互作用是可能的。这时由于容許导波系統的尺寸增大，而容易制造它了。

2. 相干輻射的获得

在討論产生亚毫米波的各种方法之前，我們先来談一談对

下面将要探討的各个电磁波振蕩源有意义的一个原則性的問題：輻射的相干性問題。

在最簡單的情況下，当发源于同一个方向的两个振蕩 ($N=2$)

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= a_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \\ S_2 &= a_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

合成时，便得到同一周期的振蕩：

$$S = S_1 + S_2 = A \sin(\omega t + \theta), \quad (2)$$

式中 A 、 a_1 和 a_2 ——振幅； θ 、 φ_1 和 φ_2 ——各个振蕩的相位； ω ——角頻率； t ——時間。

合成振蕩的振幅 A ，可由下列关系式求得

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3)$$

由公式 (3) 可知，合成振蕩振幅的平方（与功率成正比）随着初始振蕩的相位差 ($\varphi_1 - \varphi_2$) 而变化。

如果振蕩的相位差的变化是不規則的，而且在頻率為 ω 的基波周期內，多次經過由 0 到 2π 內的一切數值，那末，在某一時時間隔內，計算合成振蕩的平均功率時，由公式 (3) 得（等式右端第三項變成等於 0）：

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2$$

或者当

$$a_1 = a_2 \text{ 时, } A^2 = 2a_1^2.$$

因此，在这种情况下，合成振蕩的功率与两个初始振蕩的功率之和成正比，而这两个振蕩本身就叫做不相干振蕩。当有很多 (N 个) 振蕩源时，合成振蕩的功率与 $N a^2$ (即 N) 成正比。

如果振蕩的相位差 ($\varphi_1 - \varphi_2$) 保持不变，那么对于不同的相位差，合成振蕩的功率可能大于或小于两个初始振蕩的功率之和。这时的振蕩称为相干振蕩。

在最好的情况下，当

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 0 \text{ 时,}$$

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 = (a_1 + a_2)^2$$

或当 $a_1 = a_2$ 时，

$$A^2 = 2^2 a_1^2.$$

其次，当振荡数 N 大于 2 时，合成振荡的功率与 $N^2 a^2$ (即 N^2) 成正比。

基本辐射源，如单个的原子、分子、带电粒子（它们是怎样辐射的，留待下面叙述）的辐射，一般都是不相干的辐射。的确，这些辐射源都相互无关地辐射出频率和相位都不相同的电磁振荡。这类辐射的功率与辐射源数 N 成正比，而且它的数值是很小的。所有发热体、石英水银灯、群粒辐射器等都是典型的不相干振荡源。

为了获得很大的辐射功率，必须使来自各基本辐射源的振荡具有相同的频率、相同方向的电场和磁场矢量以及相同的相位，也就是各振荡源都必须相干的。在这种情况下，振荡功率可与 N^2 成正比。为了保证各基本辐射源的振荡的相位相同，必须使这些辐射源的尺寸和它们之间的距离比所辐射的波长小得多。

在超高频电子器件（如磁控管、速调管等）中，同电磁系统相互作用的电子，用作电磁辐射源。这些电子器件的有效工作都与使电子群聚成稠密的电子簇有关，这些电子簇的尺寸比所产生的波长为小，而且以确定的频率（与所产生的振荡的频率相等或者是它的倍数）一个跟随着一个。正象大家所知道的，由厘米波和毫米波段的电子器件所获得的电磁振荡功率是相当大的。

随着所产生的振荡的波长的减小，产生小于波长的稠密的

电子簇，由于电子斥力的增大而显得复杂。电子的斥力是由組成电子簇的电子所产生的負空间电荷的强电场而形成的。

因此，为使各种亚毫米波段的电子振荡器（例如以利用切連柯夫效应和多普勒效应等为基础的振荡器）能够有成效地工作，就必须产生长度为波长的几分之一，即十分之几毫米的短电子簇。

这时，輻射功率为最大而且与 N^2 成正比，其中 N ——电子簇中的电子数，或者也可以說与电流强度的平方成正比。計算表明：在完全相干的条件下，可得到几万瓦的輻射功率。同时在不相干的条件下，功率不超过 1 毫瓦，即小到几千万分之一。

由厘米波波段的器件产生的比較长的电子簇，正象在制造电子倍頻器的許多实验中那样，不能在亚毫米波波段获得很大的功率。当电子簇比被輻射的波长大一些或者大得很多的时候，电子簇各段輻射出具有不同相位（虽然是不变的）的振荡。由电子簇各段所获得的振荡的迭加，在很大程度上导致它們相互抵消，从而使总的輻射功率显著降低。在这种情况下，輻射功率已經与 $k N^2$ 成正比，因为有效地参与产生輻射的只是組成电子簇的一小部分电子，这时系数 k 远小于 1。

超高频器件是单色的电磁振荡源，它的全部輻射功率，实际上都集中在一个頻率上。在亚毫米波波段內，晶体倍頻器現在是唯一的小功率单色振荡源。用带通滤波器在不相干振荡源的狭窄的一段連續頻譜內，把輻射功率分出来，这只能是产生单色輻射的某种近似。此外，由这种方法而得到的輻射功率是极为微小的。

要制造亚毫米波段的电磁振荡源，不是从发明原理上嶄新的方法着手，就是从改善用来产生毫米波輻射或紅外線輻射的

方法着手。我們就从后一方法着手来开始討論。

3. 发热体的輻射

获得亚毫米波的一种可能途径，是利用大家所熟知的产生长波紅外線輻射的方法。紅外線輻射是由于分子的旋轉运动或振蕩而发生的。分子运动还与物体温度有关。因此一切物体通常都是热輻射或紅外線輻射源。但是紅外線波段的长波部分中的輻射功率很小，在亚毫米波段內輻射功率下降得更快（图1）。譬如加热到 $10,000^{\circ}\text{K}$ 的物体所輻射的功率，在 λ 从1毫米到0.75毫米的波段內，估計为 10^{-8} 瓦。因此，十分明显，利用发热体作为亚毫米波輻射发生器是不适宜的。

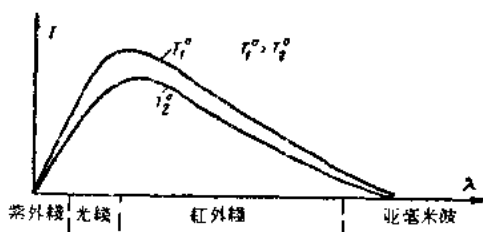


图1 发热体的輻射光譜

λ —波长； I —以相对单位表示的輻射强度；

T° —物体的温度。极大值通常是在 λ 从0.1到10微米的范围内

4. 石英水銀灯

目前超高压石英水銀灯，实际上是总輻射功率在波长由0.1毫米到1.6毫米的寬波段內达到毫瓦級的唯一的、也是最方便的輻射源。灯內压力为几十大气压，放电間隙的温度为几千度。

对水銀蒸汽中放电时所激励的輻射的頻譜以及它跟电压、电流密度、蒸汽压力、灯泡尺寸等关系，曾进行过多次的研

究。但直到目前为止，对于这个辐射的实质，还没有一个统一的论点。一方面它解释为在激励后的水银分子中的振荡-旋转跃迁的表现；另一方面也解释为电子在正离子场中的减速。

5. 群粒辐射器

A. A. 格拉果列娃-阿尔卡杰娃在1922年创造的群粒辐射器(图2)，是由盛有金属屑(黄铜屑或铝屑)和粘滞性电介质(如机油或变压器油)混合物的容器1所组成。混合物用搅拌器2不断的搅拌。卡波利特塑料小轮3，在水平轴上转动。小轮旋转时把混合物带走，这时在它的上面便形成了一条液流。感应器6的火花穿过液流的某一段5(这一段是辐射的)中的这种混合物：火花在金属屑中激励出能量很大的电振荡。

群粒辐射器的工作原理，可象下面这样来解释。组成混合

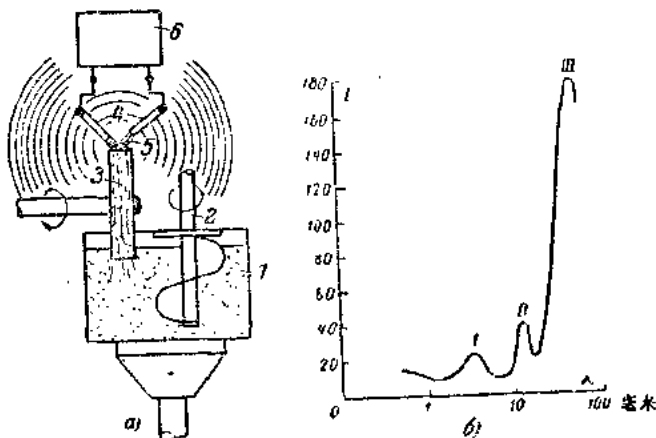


图2 格拉果列娃-阿尔卡杰娃的群粒辐射器

a—示意图；1—盛有金属屑和油的容器；2—搅拌器；3—卡波利特塑料小轮；4—电极；5—辐射部分；6—高压电源(感应器)；б—利用温差电偶测量的辐射频谱；λ—温差电偶的固有波长；I—相对单位的辐射强度

物的金属屑被填满电介质的空隙隔开。这时当有电压从感应器 6 输入时，所形成的电容开始充电，直到发生火花击穿时为止。当发生火花击穿时，在金属屑的空隙间有电流流过，磁场与这个电流相互联系着。这样一来，每一对金属屑，都可以认为是一定的电容和电感，并把它看作是基本振荡回路。因为电容和电感的数值都极小，所以可得到波长相当于亚毫米波波段的振荡。

其次，由于金属屑的尺寸和其间的空隙都能与所辐射的波长相比拟，因此产生向外部空间辐射的电磁波。当火花击穿时，被激励的这类单个基本辐射器所辐射的振荡，由于有损耗而有衰减的特性。进入辐射段 5 的大小不同的金属屑的总和，将产生具有不同波长和随机相位的振荡。因此群粒辐射器是非相干的电磁振荡源。

在群粒辐射器中，不仅能由个别金属屑偶产生辐射，而且也能由所有金属屑偶的总和——金属屑链产生辐射。当然，在第二种情况下能获得波长较长的辐射。

测得的群粒辐射器的辐射频谱（从 $\lambda=50$ 毫米到 $\lambda=0.082$ 毫米）有三个极大值（图 2, 6）。短波上的极大值 I 相当于单个颗粒的振荡；中波上的极大值 II 相当于一对颗粒的振荡；最大的峰值 III 相当于一串颗粒的振荡。这一串颗粒的长度与粒群中火花放电的路径有关。

频谱中存在极大值表明：辐射源本身可能有一定的单色性。伏打弧、石英水银灯这类辐射源，在原则上不可能有这种单色性。但群粒辐射器分布在各狭窄频谱段上的辐射功率毕竟极小的。此外，辐射器辐射的功率总会波动。因此群粒辐射器只用在科学研究中。利用一种最新的群粒辐射器，曾在 λ 从 3 毫米到 6 毫米的波段内，得到了 300 毫瓦以下的功率。

第二章 电子倍增器

6. 超高频器件所产生的高次谐波

正象上面所讲过的，在超高频波段的电子器件中，如磁控管、速调管、返波管、行波管等，都将电子聚集成一串周期性的电子簇。随着时间不断变化的电荷，激励电磁场，而电磁场的能量可用高频系统由电子流中选择出来并加以利用。群聚后的电子流，既含有基频，也含有高次电流谐波，这些谐波可以用来产生比较短的波。

参看图 3 上的直渡式速调管，就能更清楚地弄清楚群聚过程。被加速而尚未群聚的电子流，由电子枪 1 飞入速调管的输入谐振器 2，在谐振器的缝隙里，在被激励于基频 f 上的交变电场中，发生电子的速度调制。由谐振器飞出的速度不同的电子，在漂移管 4 中继续运动，漂移管中没有电场。这时以较大速度飞越的电子，逐渐赶上先前飞出的速度较慢的电子。因此连续的电子流将分为一个一个的电子簇 5。图 3,б 所示为不同截面上电子流的群聚情形。

正象分析所指出的那样，电子流群聚能力越强，其中所包含的高次电流谐波就越多。谐波振幅随其次数增加而减小。在最好的群聚情况下，即当第一基波的振幅为 $1.16I_0$ （其中 I_0 —电子束电流的直流分量）时，二次谐波振幅为 $0.98I_0$ ，三次谐波为 $0.86I_0$ ，五次谐波为 $0.76I_0$ ，十次谐波为 $0.62I_0$ ，二十次谐波为 $0.51I_0$ ，以下类推。由于排斥电子簇中电子的空间电荷的影响，使电流谐波的振幅随谐波次数而更加显著的减小。一系列的周期性的电子簇，在直渡式速调管的输出谐振器 6 中

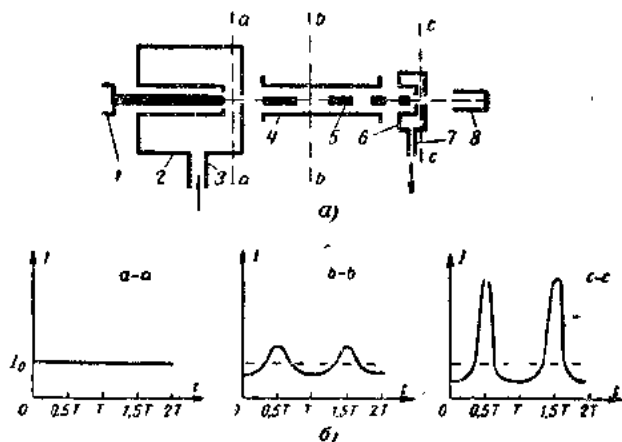


图 3 直流式速調管 (倍頻器)

a—直流式速調管 (倍頻器) 的示意图。1—电子枪; 2—输入谐振器; 3—高频 f 的输入端; 4—漂移管; 5—群聚后的电子束; 6—输出谐振器; 7—高频 nf 的输出端; 8—集电极; 6—电子束不同截面上的电流 I 与时间的关系 (T —基频周期)

激励电磁振荡。谐振器既能调谐于基波, 又能调谐于它的高次谐波。双腔速調管在效率为千分之几时, 在分米波段和厘米波段可以得到高达 20 倍的倍频。根据报导, 用这种方法由 $\lambda = 4.08$ 厘米的速調管, 在二十四次谐波上能获得几微瓦的功率。这是许多倍频法中的一种。

下面将要讨论的电子倍频器, 也可以分为两个主要部分, 即使电子群聚的装置和输出系统 (这里所指的是由群聚后电子流中选出高频能量的那个系统)。直线加速器、谐振器等都可以作为群聚装置的例子。群聚后的电子流, 飞入某一输出系统。在输出系统中, 在电子束调制频率的相应的谐波上, 选出高频功率。各种谐振系统和非谐振系统都可以作为输出系统, 这在下面将要详细叙述。

在 n 次諧波上产生的功率，可用下列方法求得：

$$P_n = i_n^2 R_{rn},$$

式中 i_n ——“輻射器”輸入端电子束电流 n 次諧波的振幅，其大小取决于电子束群聚的程度； R_{rn} ——輻射电阻，即当諧波电流 i_n 通过时，好象輻射功率是从它里面取出来似的。輻射电阻由“輸出系統”的参数、电子束的尺寸、电子的能量来决定。

由于普通超高频器件中利用的群聚后的电子束，可能包含电流的高次諧波，因此在这些器件的輻射頻譜中，除基頻之外，还包含高次諧波。因为这类器件設有专门装置产生高次諧波的电磁系統，所以高次諧波的功率比在基頻上輻射的功率为小。的确，研究磁控管輻射中所包含的高次諧波后证明：如果磁控管的脉冲功率在基波 $\lambda = 1.25$ 厘米上为 20 千瓦，那么在三次諧波 ($\lambda = 4.17$ 毫米) 上为 0.24 瓦，在八次諧波 ($\lambda = 1.56$ 毫米) 上为 0.18 毫瓦，最后在十次諧波 ($\lambda = 1.25$ 毫米) 上最多不超过 0.12 毫瓦。

过去进行过制造在所产生的輻射中包含較多諧波的器件的尝试。所制成的其中一个磁控管，曾在基波 ($\lambda = 3.39$ 厘米) 上产生 12 千瓦的功率，而在計算的二次諧波上达到 3.4 千瓦，在三次諧波上約为 1.2 千瓦。

这样一来，为了用倍頻法产生毫米波和亚毫米波，一方面必須有能产生包含电流高次諧波的高聚群电子簇的装置，另一方面要有輻射电阻 R_{rn} 高的足够有效的“輸出系統”。

7. 場致电子放射特性的利用

当在放射体（通常是一尖針）表面建立强度达 10^7 伏/厘米的电場时，便引起場致电子放射或冷放射（电子由冷表面，例如由金属中逸出）。近几年来，在制造場致电子放射体方面所取