

微波固态频率源

理论·设计·应用

梁元春 陈世彬 编著
孙燕英 杨仁明

国防工业出版社

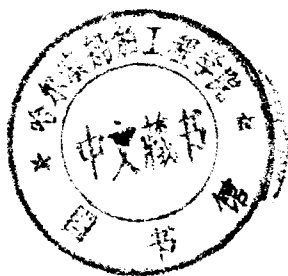
7-41

375680

微波固态频率源

理论·设计·应用

费元春 陈世伟 编著
孙燕玲 杨仕明



国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

微波固态频率源 理论·设计·应用/费元春等编著.
北京:国防工业出版社,1994
ISBN 7-118-01129-0

I. 微…

II. 费…

III. ①频率源-微波频率 ②微波振荡器

IV. TN752.5

微波固态频率源

理论·设计·应用

费元春 陈世伟 孙燕玲 杨仕明 编著

责任编辑 耿新暖

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市王史山胶印厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 $\frac{3}{4}$ 413 千字

1994 年 6 月第 1 版 1994 年 6 月北京第 1 次印刷 印数 1—2000 册

ISBN 7-118-01129-0/TN·182 定价:17.90 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容明确、具体、有突出创见,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作,职责是:负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图

书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第一届评审委员会组成人员

主任委员：邓佑生

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列) 何庆芝 何国伟 张汝果
范学虹 金 兰 柯有安
侯 迁 高景德 莫梧生
曾 铎

秘书长：刘琯德

前 言

我们正面临着—个以电子信息技术为核心的新技术革命时代。无论是以军事应用或民用为目的,电子技术都受到世界各国的高度重视。在这个领域特别值得提出的是微电子学、微波器件和电路,以它们不长的历史发展至今,已经取得举世瞩目的辉煌成就,使它们在许多电子信息系统中占居重要位置。在雷达、导航、电子对抗、微波通信、空间技术等国防工程上,或在民用微波中继通信、卫星通信、直播卫星电视、民用雷达、导航、微波遥感、测控、射电天文等民用领域,都离不开微波固态源和多种微波固态电路的开发和应用,这些领域的技术进步又推动着微波固态源的发展和更新。目前,除大功率微波发射机仍用电真空器件外,微波固态器件已在微波领域占据统治地位。迄今,无论是微波器件的性能,或微波固态振荡的理论、设计和技术都发展到一个新的水平。

随着新材料、新工艺的进展,涌现出了多种多样的微波固态器件,如:硅微波双极晶体管、砷化镓场效应晶体管(GaAs FET)、硅微波静电感应晶体管、高电子迁移率晶体管(HEMT)、雪崩二极管、体效应二极管等,为微波振荡的产生、放大和功率合成提供了有源器件。在谐振电路方面除传统的波导腔、同轴腔、微带谐振器外,发展了YIG谐振器、介质谐振器乃至极高Q值的超导材料微波谐振器。为适应宇航技术所需求的超小型微波源的要求,正在大力发展砷化镓单片微波集成电路(MMIC)。为满足新兴的高科技领域的需求,各种微波锁相固态源和微波频率合成器竞相出现,以期获得很高的长期和短期频率稳定度。一些新兴的交叉学科,如光与微波电路的相互作用——光控微波源、光注入锁定以及微波超导,展现了很好的应用前景。新一代微波固态源发展的特点是低声、宽频带、大功率、高效率、高稳定、超小型并推向更高的频率。

作者从 1968 年开始从事微波固态振荡、倍频源的研究,并结合它们在雷达、通信、制导、测量中的应用,成功地研制了 L、S、C、X、Ku、Ka 波段的压控振荡器以及 L、S、C、X、Ka 波段的高稳定锁相稳频源,开发了微波固态源的计算机辅助设计(CAD)和分析(CAA),获得广泛应用。在长期的研制工作中,笔者比较全面系统地收集和消化了有关资料,特别是一些新的理论和技术,结合实际应用,积累了自己的研制心得和看法。通过上述材料系统的总结,形成了本书的理论基础、设计方法和测试技术。在我们的研制工作中几项有特色的科研成果,如 L 波段低相位噪声压控振荡器、10cm 微波晶体管同轴腔振荡器、X 波段低相噪 GaAs FET 压控振荡器及体效应压控振荡器(Gunn VCO),以及 L、S、C、X、Ka 波段高稳定高纯度频谱源也将荟萃于本书内。与此同时,本书也充分反映国内外同行在微波固态源领域的优秀研究成果和最新的水平。

计算机辅助设计微波晶体管振荡器是今天微波领域的前沿课题,因其模型复杂,分析难度大,开发甚少。目前国际通用微波电路 CAD 软件主要是 COMPACT 和 SUPER—COMPACT TOUCHSTONE 等,但它们的内容涉及微波振荡器的设计软件甚少。就目前国内外市场情况看,尚未公开见到关于比较方便、通用的微波振荡器的软件,引为参考的资料也相当缺乏,公开发表的专著[1~4]亦很少涉及。鉴于此,作者近几年开展了微波晶体管振荡器等多种微波电路的计算机辅助设计研究,取得了良好的进展。该 CAD 解决了微波晶体管、场效应管振荡器(含窄带、宽带电调谐)的快速、准确设计难题,免除了调试人员烦琐的凑试工作,并对微波集成振荡电路、微波单片振荡器的发展具有积极意义。在本书中将反映这些研究成果:利用器件的 S 参数进行单频、多频上引入几种反馈形式的微波晶体管振荡器设计,其调谐回路采用以变容管为中心的电抗补偿网络,输出匹配网络分别采用分布参数和集中参数设计,并能对振荡器的压控特性进行线性化处理。利用该软件已有效地进行了多个振荡器的设计,其计算值与实验结果吻合良好。

全书共九章。第一章为微波固态源概论；第二章讨论微波振荡器件及谐振电路模型；第三章介绍微波场效应晶体管振荡器的计算机辅助设计；第四章是关于低相位噪声微波晶体管振荡器的设计；第五章为高稳定、高频谱纯度微波频率源；第六章讨论介质谐振器稳频微波振荡器；第七章毫米波固态源；第八章微波固态源的测试技术；第九章讨论单片微波集成电路(MMIC)振荡源。

本书前言、第一章、第二章、第四章、第六章、第七章由费元春撰写；第五章、第八章、第九章由陈世伟撰写；第三章由孙燕玲撰写；杨仕明参加了第四章、第七章部分内容的撰写。由费元春担任主编。

北京理工大学柯有安教授、北京邮电学院连汉雄教授和谢沅清教授认真审阅了本书编写大纲和内容，提出了许多宝贵意见，并给予热忱鼓励和关心。编写工作还得到俞宝传教授、楼仁海教授等的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

1992年6月于北京

目 录

第一章 微波固态频率源概论	(1)
§ 1.1 微波固态频率源发展状况	(1)
§ 1.2 微波固态源分类、技术指标和应用	(5)
§ 1.3 单端口负阻振荡器的分析	(15)
§ 1.4 双端口负阻振荡器的分析	(19)
§ 1.5 调谐方法——机械的、电子的、数字的、光的调谐	(28)
§ 1.6 振荡器的电路组态和直流偏置	(34)
§ 1.7 频率源的长期频率稳定度分析	(40)
§ 1.8 频率源的相位噪声分析	(45)
§ 1.9 由相位噪声模型分析、设计振荡器	(52)
第二章 微波振荡器件及谐振电路模型	(59)
§ 2.1 微波双极晶体管模型	(60)
§ 2.2 微波场效应晶体管模型	(65)
§ 2.3 体效应二极管模型	(70)
§ 2.4 雪崩二极管模型	(74)
§ 2.5 变容二极管模型	(77)
§ 2.6 微波谐振回路的等效模型	(80)
§ 2.7 微波振荡器中其它常用元件的等效模型	(107)
第三章 微波场效应晶体管振荡器的计算机辅助设计	(111)
§ 3.1 电路组成和用于振荡器设计的 S 参数	(112)
§ 3.2 负阻振荡器的参数优化	(122)
§ 3.3 振荡器调谐回路和反馈网络的设计	(126)
§ 3.4 电调谐振荡器输出匹配网络设计	(136)
§ 3.5 微波 GaAs FET 振荡器设计举例	(146)
§ 3.6 YIG 调谐 GaAs FET 振荡器	(161)
§ 3.7 微波 GaAs FET 振荡器电路集锦	(167)

第四章 低相位噪声微波晶体管振荡器的设计	(174)
§ 4.1 微波双极晶体管的主要性能参数	(174)
§ 4.2 采用变容管—传输线谐振器的压控振荡电路的分析与设计	(179)
§ 4.3 双管平衡型 BJT 压控振荡器	(189)
§ 4.4 10 厘米微波晶体管同轴腔振荡器的设计	(196)
§ 4.5 8GHz 偏置调谐的低相位噪声振荡器	(206)
§ 4.6 微波晶体管振荡器的幅度和频率调制	(211)
§ 4.7 微波晶体管振荡器的频率漂移及温度补偿	(218)
§ 4.8 数字调谐的微波晶体管振荡器	(226)
§ 4.9 低噪声异质结双极晶体管(HBT)振荡器	(227)
第五章 高稳定、高频谱纯度微波频率源	(236)
§ 5.1 固态微波源的稳频原理及稳频方法	(237)
§ 5.2 晶振—倍频链微波源	(240)
§ 5.3 高 Q 腔稳频微波源	(241)
§ 5.4 低相位噪声 2GHz 表面横向波振荡器	(251)
§ 5.5 注入锁相微波振荡源	(259)
§ 5.6 环路锁相微波振荡源	(283)
§ 5.7 具有噪声负反馈的低噪声 GaAs FET 振荡器	(315)
§ 5.8 单片微波集成电路(MMIC)锁相频率源	(318)
§ 5.9 数字微波频率合成器	(326)
第六章 介质谐振器稳频微波振荡器	(343)
§ 6.1 介质谐振器(DR)的主要性能和分类	(343)
§ 6.2 介质谐振器的调谐与耦合	(346)
§ 6.3 DR 并联反馈型微波 GaAs FET 振荡器的设计	(354)
§ 6.4 DR 串联反馈型微波晶体管振荡器的 CAD	(359)
§ 6.5 变容管调谐的 DR 稳频振荡器的设计	(371)
§ 6.6 介质谐振器稳频的微带型体效应振荡器	(376)
§ 6.7 双介质谐振器稳频振荡器	(383)
第七章 毫米波固态源	(386)
§ 7.1 发展和应用概述	(386)
§ 7.2 毫米波压控振荡器的计算机辅助分析与设计	(388)

§ 7.3 毫米波腔稳固态源	(396)
§ 7.4 低相位噪声 HBT 毫米波振荡源	(403)
§ 7.5 宽带调谐的毫米波固态源	(412)
§ 7.6 毫米波单片 IMPATT VCO	(417)
§ 7.7 微波、毫米波功率合成技术	(421)
第八章 微波固态源的测试技术	(430)
§ 8.1 微波器件 S 参数的测量	(430)
§ 8.2 微波频率及其长期稳定度的测量	(436)
§ 8.3 微波功率测量	(444)
§ 8.4 短期频率稳定度的测量	(449)
第九章 单片微波集成电路(MMIC)振荡源	(461)
§ 9.1 单片微波集成电路的材料和元件	(461)
§ 9.2 单片微波集成振荡源设计特点和典型工艺	(467)
§ 9.3 MMIC 振荡器、压控振荡器的计算机辅助设计	(471)
§ 9.4 MMIC 振荡器及压控振荡器举例	(473)
附录 1 双端口网络参数之间的转换	(481)
附录 2 稳定判别圆	(484)
参考文献	(486)

第一章 微波固态频率源概论

§ 1.1 微波固态频率源发展状况

微波固态频率源简称微波固态源,是通信、雷达、电子对抗、测试仪表等各种微波系统中应用广泛的重要设备。

60年代以前,微波振荡器几乎都是由微波电真空器件如反射速调管、磁控管、返波管等构成。这类器件一般都存在工作电压高、供电种类繁多、功耗大、结构复杂、体积庞大、成本高等缺点,不能适应电子技术发展的需要。50年代末期出现了晶体振荡器为主振、变容管倍频的微波倍频源,但由于倍频效率的限制,不易在高的频率下获得大的输出功率。1963年出现了体效应器件(Gunn)和1965年雪崩管振荡器、以及L波段微波晶体管振荡器的问世,都大大地促进了微波半导体振荡器即微波固态源的研究和发展。微波固态源是通过谐振电路与微波半导体器件的相互作用,把直流功率转换成射频功率的装置,其主要优点是工作电压低、效率高、寿命长、体积小、重量轻。鉴于微波固态源的发展和频率、功率等性能的提高都依赖于微波固态器件的发展,因此下面首先介绍目前微波固态器件的进展情况。

1.1.1 固态微波发射器件水平

根据固态微波器件的固有特性,目前各种器件能够发挥最大作用的频段大致为:L波段以下,硅双极晶体管和硅场效应晶体管(FET)为主;L~S波段,硅双极晶体管为主;S~C波段,硅双极晶体管和砷化镓场效应晶体管(GaAs FET)二者兼有;C~K波段,以GaAs FET为主;Ku~Ka波段以上以体效应二极管和雪崩管

为主。

功率 GaAs FET 的开发水平是:国外 6GHz, 25W; 8GHz, 20W; 10GHz, 10W; 20GHz, 1.1W; 国内 4GHz, >4W; 10GHz, >1W。

硅微波双极功率晶体管的技术水平是:国外 0.4GHz, 120W; 1GHz, 100W; 3GHz, 15W; 4.2GHz, 5W, 8GHz; 2W; 10GHz, 1.5W。国内 0.4GHz, 100W; 1.5GHz, 30W; 3GHz, 10W。

崩越管的典型技术水平是:国外硅双漂移 IMPATT 60GHz, 连续波输出 2.4W; η 为 8.8%; 94GHz, 0.9W。GaAs IMPATT 40GHz, 连续波输出 8W, η 为 20%; 20GHz, 7.2W, η 为 21%; 94GHz, 1.5W。国内硅 IMPATT, 33GHz, >1W。

限于篇幅,体效应器件等不再一一例举。

1.1.2 固态微波低噪声振荡、放大器件水平

无论微波频率合成器,或是通信、雷达系统接收机前端,都要求低噪声,这是提高设备性能的关键。欲降低噪声,系统必须采用低噪声的微波器件。因此,必须研制低噪声压控振荡器和放大器。微波低噪声器件用作振荡和放大的主要有:GaAs FET、高电子迁移率晶体管 (HEMT)、硅低噪声双极晶体管、异质结晶体管 (HBT) 等。

1. GaAs FET 器件

GaAs FET 是一种多用途器件,具有频带宽、噪声低、结构紧凑、可靠性高等特点。目前国外低噪声 GaAs FET 的技术水平如表 1-1 所示。

表 1-1 国外低噪声 GaAs FET 的技术水平

$f(\text{GHz})$	4	8	12	18	30	60
$N_F(\text{dB})$	0.4	1.0	1.3	1.75	4	7.1
$G_a(\text{dB})$	14.5	11.5	11.5	8.5	5	5

上表中 N_F 为噪声系数, G_a 为资用功率增益。

国内 GaAs FET 的技术水平是:4GHz, $N_F=0.4\text{dB}$ (最佳值),

$G_a = 14.5\text{dB}$; 12GHz , $N_F = 1.2 \sim 2.2\text{dB}$, $G_a = 7\text{dB}$ (典型值), 最佳值是 $N_F = 1.1\text{dB}$, $G_a = 9\text{dB}$; 18GHz , $N_F = 3.5\text{dB}$, $G_a = 6.2\text{dB}$ (典型值)。

2. 硅微波低噪声双极晶体管

在 S 波段以下, 尽管砷化镓场效应管的噪声低于硅双极晶体管, 但由于在电路匹配、可靠性、一致性和成本方面的原因, 硅双极晶体管仍占优势。当前, 3GHz 以下的噪声已达到器件的最好水平。国外产品水平是: 0.7GHz , $N_F = 0.8\text{dB}$ (日本 NEC); 2GHz , $N_F = 1.3 \sim 1.4\text{dB}$, $G_a = 12\text{dB}$ (美国 HP 公司); 4GHz , $N_F = 2.5\text{dB}$, $G_a = 9\text{dB}$; 6GHz , $N_F = 2.5\text{dB}$, $G_a = 13\text{dB}$ (日本富士通)。

3. 固态微波新器件——高电子迁移率晶体管

高电子迁移率晶体管 (HEMT) 是一种噪声系数极低的新型固态微波器件, 主要用于低噪声放大, 尤其适合极低噪声的微瓦量级振荡的放大, 构成低相位噪声微波固态源。目前 HEMT 在 4GHz 上, 噪声系数 $N_F = 0.25\text{dB}$, $G_a = 11.7\text{dB}$; 在 18GHz 上, $N_F = 0.51\text{dB}$, $G_a = 10.8\text{dB}$; 在 40GHz 上, $N_F = 1.9\text{dB}$, $G_a = 5.3\text{dB}$ 。据报道, 工作在 $60 \sim 65\text{GHz}$ 频段的三级低噪声 InP 基 HEMT 放大器, 已获得噪声系数 $N_F \approx 3\text{dB}$, $G_a = 22 \pm 0.2\text{dB}$ 。另一种新型固态器件是 Al GaAs/GaAs 异质结双极晶体管 (HBT), 其截止频率可望超过 150GHz , 目前已得到 50GHz 振荡器的结果, 其相位噪声比 GaAs MES FET 减小至 $1/300$ 。还有一些新器件正处于探索研究中, 可望不久会有更多高水平的器件问世。

1.1.3 GaAs 单片微波集成电路 (MMIC) VCO

近年来, 以 GaAs FET 为基础的单片微波集成技术, 在国际上发展十分迅速, 和其它微波电路相比, MMIC 的特点是更加小型化, 宽带化, 模块化, 可靠性高, 成本低。各种单片宽带放大器、单片低噪声放大器和功率放大器、单片振荡器、混频器、移相器、开关等都已研制成功, 其性能水平不断提高, 在降低成本、提高成品率方面有了突破。除此外, 利用同一单片, 把放大、振荡、混频和其它控制器件与电路都集成为一个子系统——接收模块或发射模

块,目前已获得广泛应用。如工作频率为 9.2~10.2GHz,5W 的有源相控阵雷达收发模块已批量生产。就单片微波振荡器而言,已从 X 波段发展到毫米波段。新近开发的 11~11.88GHz HBT 单片振荡器,已获得输出功率为 219mW, $\eta=31\%$; X~Ku 波段 VCO,其调谐带宽覆盖为:11.15~14.39GHz, 16~18.74GHz; 单片毫米波 GaAs FET 振荡器,在 60~70GHz,输出振荡功率为 0.1~1.0mW, $\eta=1\%$ 。一种高效率毫米波单片 GaAs IMPATT 振荡器,其崩越管为双漂移结构,单片振荡器频率为 30~90GHz,最好性能是 32.5GHz,输出功率达到 1.25W,效率 27%。与此同时,高功率 MMIC 放大器取得惊人进展:如 20GHz MMIC FET 功率放大器输出功率达 20W, L 波段 30kW 的固态发射机已研制成功。

1.1.4 微波固态源稳频及调谐技术的新进展

除上述微波固态器件外,在微波谐振电路和稳频技术方面也取得飞速发展。崭露头角的介质谐振器(DR)是其中的佼佼者。它采用高介电常数、低损耗的微波陶瓷材料制成。其介电常数高达 30 至 90,在微波频段的无载品质因数可达 10 000 以上。这种谐振器的突出优点是体积很小、温度稳定性好,可在较宽的微波频段与微波晶体管集成电路相结合,构成结构紧凑、性能优良的介质谐振器稳频固态源(DRO)。目前 DRO 可在一到几十吉赫范围内直接产生所需频率的振荡功率,其频率稳定度高、噪声低、价格便宜。据报道,11.85GHz 并联反馈型 DRO 在环境温度 $-20\sim+60^{\circ}\text{C}$ 范围内频率变化仅 $\pm 150\text{kHz}$ 。频率温度系数为 $\pm 0.16\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ [⊖]。亦可采用恒温的方法来提高 DRO 的温度稳定性,这样可使 DRO 温度系数改善到 $\pm 0.02\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$,并具有好的相位噪声特性,在偏离载频 10kHz 处,单边带(SSB)相位噪声为 $-130\text{dBc}/\text{Hz}$ 。一种用变容管电调的 L 波段 DRO 电路,其有源器件为双极型晶体管,在频率 1280MHz 实现的相对电调带宽虽只有 0.027%,但振荡器相位噪声极低,在偏离载频 10kHz 处 SSB 相位噪声为 $-142\text{dBc}/\text{Hz}$ 。

⊖ ppm 是 parts per million 的缩写, $1\text{ppm}=10^{-6}$ 。

随着高 T_c 超导的微波应用发展,国外已研制成高 T_c 超导薄膜带状线谐振腔,并用于稳定振荡器,从而使微波振荡器相位噪声降低 20dB。展示了超导材料在微波、毫米波固态源领域具有潜在的应用价值。

微波振荡器的调谐技术发展迅速,除变容管调谐、YIG 调谐外,参量调谐、数字调谐、光调谐技术又有新进展。光与微波电路的相互作用研究,促进了光控振荡器、光波的微波调制以及利用光导器件由直流直接产生微波、毫米波的发展,展示了微波源的新前景。

微波固态频率源的稳频技术、低噪声技术的发展尤其神速。各种锁相稳频源和微波频率合成器,频率高端已推到 110GHz 以上。长期频率稳定度优于 10^{-9} /日,相位噪声谱密度低至 $\mathcal{L}(1\text{kHz}) = -150\text{dBc}/1\text{Hz}$,达到了空前的技术水平。

为适应现代电子战的需要,各种宽带、超倍频程带宽的微波频率源相继涌现。为了满足空间技术和电子设备轻小型化的需要,除单片 VCO 外,多种微波厚膜、薄膜、高密组装的 VCO 亦得到广泛开发和应用。

§ 1.2 微波固态源分类、技术指标和应用

1.2.1 微波固态源分类

微波固态源分类方法很多,可根据工作频段、带宽、采用的器件类型、电路结构形式、调谐方式、稳频方式、功率大小、相位噪声高低等特征进行分类,这里仅介绍其中几种分类。

1. 振荡器的工作频段和带宽

按照振荡器工作的频段和带宽可划分为 P、L、S、C、X、Ku、Ka、W 波段的振荡器,或相应波长的振荡器。根据振荡器工作带宽又可分为宽带与窄带的形式。

2. 根据器件类型划分

- (1) 双极晶体管振荡器;
- (2) 场效应管振荡器;