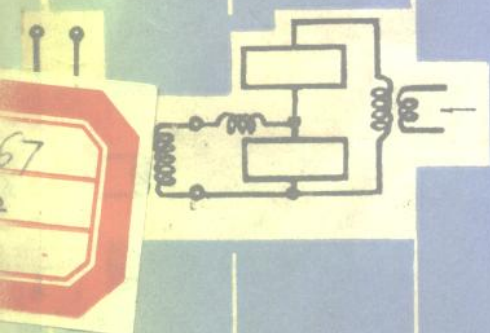


半导体手册
第15编



参量放大器



科学出版社

《半导体手册》第15編

参 量 放 大 器

《半导体手册》翻译组译

1102799

科 学 出 版 社

1 9 7 0

《半导体手册》第15编
参量放大器

《半导体手册》翻译组译

*

科学出版社出版

北京西直门外三里河路2号
北京市书刊出版业营业许可出字第061号

铁道部印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1970年12月第一版 开本：787×1092 1/32

1970年12月第一次印刷 印张：3 1/2

字数：73,000

统一书号：15031·282

本社书号：3638·15—7

定价：0.26 元

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

外国有的，我們要有，外国沒有的，我們也要有。

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

譯 者 的 話 1102799

本书是根据〔日〕半导体手册編委会編《半导体手册》1963年初版本译出。内容包括半导体物理学、半导体材料、晶体二极管和晶体三极管的工作原理、晶体二极管和晶体三极管、特种半导体器件、晶体二极管和晶体三极管特性、半导体电路理论、线性放大、振荡、调制与解调、脉冲电路、数字电路、电源、微波电路、参量放大器、数据等16編。

本书于1966年已全部译完，因工作量较大，未能及时出版。最近，我们征求读者意见，认为做为一般了解和查阅半导体电子技术的参考书，还应出版。我们遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，为适应读者的要求，又继续进行审查校对，现将其单行出版。

本书主要特点是将半导体基础知识和应用技术综合汇编在一起的半导体电子技术的资料性参考书。书中在基础知识方面涉及的范围较为广泛，在应用技术方面介绍的比较全面，各編重点不一样，仅供读者参考。

原书中主要缺点表现在：有些編的内容尚有形式化的数学推导较多，物理分析较少；有些編在讲解概念和理论分析上有些模糊；有些編在文字和数字上有错误；有些編则为一些资产阶级学术权威和厂商吹嘘、捧场；有些編内容是从别的资料中传抄过来的，未经过实践验证。我们遵照伟大领袖毛主席“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”的教导，加以刪

节和校正。

本书在译校过程中，很多工厂、学校、科研单位给予了很大的支持和热情帮助，并提出不少宝贵意见，我们对这些单位表示衷心的感谢。

由于外文、专业知识的限制，在文字翻译及技术概念的表达上不免会有错误，又由于我们毛泽东思想学习的不够好，所以对原书中的其他错误观点及存在的问题，未能指出和很好的批判，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 概述	(1)
1.1 历史背景	(1)
1.2 参量放大器的分类和名称	(1)
第二章 基础理论	(5)
2.1 非线性电抗的基本特性	(5)
2.1.1 上边带方式	(7)
2.1.2 下边带方式	(7)
2.2 用小信号理论进行分析	(7)
2.2.1 频率 f_p 所激励的非线性电容的特性	(7)
2.2.2 用外电路将一切无用边带短路进行分析	(8)
2.2.3 用外电路将无用边带开路进行分析	(11)
2.3 调制和解调	(12)
第三章 参量放大器晶体二极管	(14)
3.1 非线性电容晶体二极管的理论	(14)
3.1.1 耗尽层电容	(14)
3.1.2 扩散电容	(16)
3.2 参量放大器晶体二极管的设计	(17)
3.2.1 晶体二极管的特性常数	(17)
3.2.2 优值的分析	(19)
3.3 晶体二极管特性的测量法	(25)
3.3.1 阻抗的测量	(25)
3.3.2 Q 值和截止频率的测量	(25)
3.4 晶体二极管的特性	(29)

3.4.1	阻抗特性	(29)
3.4.2	噪声特性	(31)
3.4.3	温度特性	(32)
3.4.4	特性一览表	(34)
3.5	新型晶体二极管	(35)
3.5.1	能减少串联电阻 R_s 的结构	(35)
3.5.2	能增大参数激励系数的结构	(36)
3.5.3	行波型	(39)
第四章	下边带参量放大器	(40)
4.1	晶体二极管的优值	(40)
4.1.1	用外电路将一切无用边带短路进行分析	(40)
4.1.2	用外电路将一切无用边带开路进行分析	(42)
4.1.3	参量放大器的等效电路	(43)
4.2	负电阻	(46)
4.3	放大电路的结构	(47)
4.4	放大增益	(48)
4.4.1	直接放大	(49)
4.4.2	变换放大	(51)
4.4.3	两种放大器的比较	(51)
4.5	频带宽度	(52)
4.6	噪声指数	(54)
4.6.1	变换放大	(55)
4.6.2	直接放大	(56)
4.6.3	下边带参量放大器的噪声指数最小条件	(57)
4.6.4	有 R_L 存在时的噪声指数	(58)
4.6.5	双边带接收的噪声指数	(58)
4.6.6	最适工作点	(59)
4.6.7	用冷却方法降低噪声	(61)
4.7	稳定性	(62)
4.7.1	激励功率的变动	(62)

4.7.2	激励频率的变动	(63)
4.7.3	晶体二极管的温度特性	(63)
4.7.4	偏压的变动	(63)
4.7.5	循环传输器的温度特性	(63)
4.7.6	直接放大与变换放大的稳定性的比较	(64)
4.7.7	消除不稳定因素的方法	(64)
4.8	设计例	(67)
4.8.1	直接放大	(67)
4.8.2	变换放大	(70)
4.8.3	双边带接收	(71)
第五章	上边带参量放大器	(73)
5.1	放大增益	(73)
5.2	噪声指数最小条件	(74)
5.3	放大增益最大条件	(76)
5.4	总噪声指数最小条件	(78)
5.5	频带与稳定性	(78)
5.6	设计例	(79)
5.7	发射变频器	(80)
第六章	行波型参量放大器	(84)
6.1	相位条件	(85)
6.1.1	输入为 f_1 和 f_2 两种成分时的增益	(85)
6.1.2	行波型参量放大器的相位条件	(88)
6.2	放大特性	(88)
6.2.1	放大增益的单向性	(88)
6.2.2	频带、噪声指数	(89)
6.3	设计例	(90)
第七章	特殊方式	(92)
7.1	上下边带共用方式	(92)
7.2	低频激励方式	(93)

7·2·1 张氏方法	(94)
7·2·2 荷甘方法	(95)
7·3 作为限幅器的动作	(96)
7·4 作为不可逆元件的动作	(97)
参考资料	(99)

第一章 概 述

1.1 历史背景

很早以前就发现电抗随时间变化的电路具有非常有趣的现象,这种现象叫做参数激励。后来,虽然又进一步进行了研究,但在应用方面没有得到任何收获。直到最近,发现参数激励的各种现象可以应用于低噪声放大器(主要是高频)和逻辑电路元件(参量器)^[7]等方面以后,这才很快受到重视。本编准备就低噪声放大器的应用进行论述。

要想用电的方法改变电抗,就需要有非线性电感或非线性电容。这些元件是使用铁氧体、电子束和晶体二极管。其中,以使用晶体二极管势垒层电容为最优越,并已得到了迅速发展。关于以这种势垒层电容作非线性电抗的放大器的基础理论,在1948年首先提出^[1,2],后来,又进行了详细研究^{[3-5], [12,49]},从理论上解释了晶体二极管的噪声特性^[6],它的低噪声特性特别引起了人们的重视,这才具体试制了超高频放大器。根据这个理论试制或实验了放大器,结果充分发挥了低噪声放大器的优越性能。这些放大器的适用频率范围很广,可达几十兆赫到几十千兆赫。

1.2 参量放大器的分类和名称

对阻抗随频率 f_p 变动的电路元件施加某一频率 f_1 的正弦

波,则产生与此不同的频率 f_{mn}

$$f_{mn} = mf_p + nf_1 \quad (15.1)$$

式中 m, n 是正或负的整数。这是变频器上的现象,现已得到广泛的应用。但是,它的性质根据变化的元件是电阻还是电抗而有很大的不同。关于电阻的情况,主要在第十四编的降频变换器(向下变换器)、检波器等部分讨论过了。本编讨论电抗的情况,它的特点是能量随频率的变化而增减,也就是能够产生放大的作用。

这种放大现象可以分为以下三种基本类型。第一种类型是对输入频率 f_1 引出上边带波 $f_p + f_1$ 的变频器,如图 15.1(a) 所示 [在式 (15.1) 中, $m = 1, n = 1$]。这叫做上边带变频器。如下一章所述,这时可以得到的增益为

$$G_p = \frac{f_p + f_1}{f_1} \equiv \frac{f_3}{f_1} \quad (15.2)$$

因此,要想得到更大的增益,一般要选取 $f_3 \gg f_1$ 的输出频率,这种变频器通常叫做上边带向上变频器。这种向上变频器不用电阻而用电抗作非线性元件,能得到相等于输入输出频率比的增益,所以较为有利*。这种原理可以看作与现在磁放大器、介质放大器所用的原理基本相同。

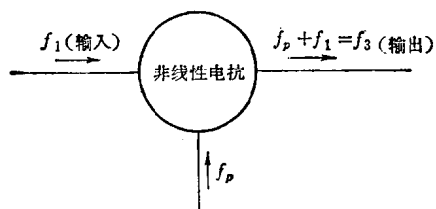
第二种类型是对输入频率 f_1 引出 $f_p - f_1$ 的变频器,如图 15.1(b) 所示 [在式 (15.1) 中 $m = 1, n = -1$]。这叫做下边带变频器。和上述上边带变频器的情况不同,这时的电路成为一种再生放大器。因此,能够取得很大的变换增益值。和上边带变频器一样,这时也以 $f_3 > f_1$ 状态使用时,在噪声指数和频带宽度等上多为有利,这种变频器通常叫做下边带向

* 另一方面,在输入频率较输出频率高,即所谓向上变换器(第十四编第三章)来说,如采用非线性电抗就会成为损耗而不利。由此可知,必须采用非线性电阻。

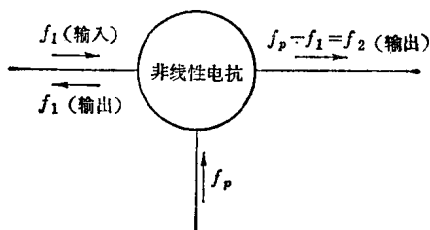
上换频器。

第三种类型与第二种类型的原理相同，不过第三种类型能够用与输入频率 f_1 相等的频率作输出来进行放大，如图 15·1(b) 所示。这种类型通常叫做负电阻放大器。

此外，利用各种边带也能形成放大器，这些总称为参量放大器。除这个名称外，通常还有叫做电抗耦合放大器、可变电容放大器、低噪声微波放大器、参数放大器以及参量器放大器，其实都是一个意思。只是最后的参量器放大器有时专指第



(a) 上边带变频器(第一种类型)



(b) 下边带变频器(第二种类型)和负电阻放大器(第三种类型)

图 15·1 信号与主要边带的关系

三种类型即下边带负电阻放大器而言。归纳以上各种名称示于表 15·1。

表 15·1 根据原理分类的主要参量放大器的名称

	名 称	输入频率	输出频率	输出频率大于输入频率
参 量 放 大 器	上边带变频器	f_1	$f_p + f_1 \equiv f_3$	上边带向上变频器
	下边带变频器	f_1	$f_p - f_1 \equiv f_2$	下边带向上变频器
	负电阻放大器 (参量器放大器)	f_1	f_1	

使用下边带的第二和第三种类型参量放大器，实质上与用作电子计算机、电子交换机等的逻辑电路元件的参量器^[7]是一样的，但在使用方法、工作状态等方面有很大的不同，必须注意不要混同。本编首先解释一下非线性电抗的变频基本理论，然后以此为基础，介绍参量放大器的应用范围。此外，非线性电抗的应用范围很广，可以用于倍增器、脉冲调制器等方面。关于这些问题请参阅第十四编。

第二章 基础理论

2.1 非线性电抗的基本特性

在分析参量放大器的各种特性之前,先讲讲非线性电抗的基本特性。现在研究一下如图 15.2 所示的两个不同基本频率 f_p 、 f_1 激励的非线性电抗。这时,由于电抗的非线性而产生无数的边带波,不论电抗是电容性还是电感性的,各边带波间的功率分配关系总是得到同样的结果,这可以用下面两个独立式来表示。

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{mW_{mn}}{mf_p + nf_1} = 0 \quad (15.3)$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{nW_{mn}}{mf_p + nf_1} = 0 \quad (15.4)$$

式中 W_{mn} 表示频率为 $f_{mn} = mf_p + nf_1$ 时的有效功率。上式叫做曼利·罗式^[3](关于这个公式的详细导出过程,请参阅第

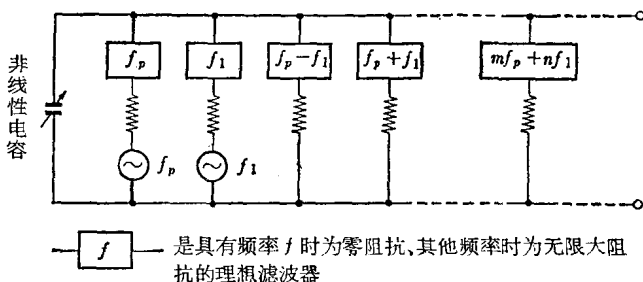


图 15.2 两个基本频率激励非线性电容时的说明图

七编第 2.5 节)。

利用这两个式可以求出使用各边带波时的功率分配关系。但主要使用的边带波 $f_{m,n}$ 只有 $f_{1,-1} = f_p - f_1$ 的下边带波和 $f_{1,1} = f_p + f_1$ 的上边带波两种。因此,下面对于下边带波用 f_2 符号,对于上边带波用 f_3 符号来表示。另外,对于基波则用激励频率 f_p 和信号频率 f_1 的符号来表示。所以在下面的分析中,除上述 f_p 、 f_1 、 f_2 、 f_3 四种频率外的边带波成分 $f_{m,n}$,设想为一律被外电路上的理想滤波器所消除。

对于边带波只是上边带波 f_3 和只是下边带波 f_2 时,解曼利·罗式,就能根据式 (15.3) 和式 (15.4) 得出表 15.2 的 (1) 和 (2)。

表 15.2 基本情况下的功率分配关系(调制器)

	曼利·罗公式	W_p	W_3	W_2	W_1		增 益	摘 要
(1) 用上边带的方式(非倒相型)	$\frac{W_1}{f_1} = -\frac{W_3}{f_3}$ $\frac{W_p}{f_1} = -\frac{W_2}{f_2}$	+	-	/	+	稳 定	$\frac{-W_3}{W_1} = \frac{f_3}{f_1}$	可取得 f_3/f_1 的增益
(2) 用下边带的方式(倒相型)	$\frac{W_1}{f_1} = \frac{W_2}{f_2}$ $\frac{W_p}{f_p} = -\frac{W_2}{f_2}$	+	/	-	-	不 稳 定	$\frac{-W_2}{W_1} = -\frac{f_2}{f_1}$	由于再生作用,增益表现为负

+ 号表示功率输入非线性元件, - 号表示输出。以 f_p 为激励频率,以 f_1 为信号频率。因而增益以 W_1 为基准来表示。

表中 W_p 、 W_3 、 W_2 、 W_1 分别表示与频率 f_p 、 f_3 、 f_2 、 f_1 相对应的有效功率,其符号为正时表示功率输入非线性元件,其符号为负时表示功率从非线性输出。因此,在一切方式中,激励功率 W_p 能得正值,说明频率 f_p 的功率变成能源经常供给非线性元件。下面如根据这个条件用曼利·罗式来求其他频率

的功率 W_3 、 W_2 、 W_1 的符号,就能看出这个系统对输入是稳定的还是不稳定的,同时可以了解频率变换产生的能量是增是减。

2.1.1 上边带方式 如表 15.2(2) 所示,设 $W_p > 0$, 则 $W_2 < 0$, 于是 $W_1 < 0$, 信号频率 f_1 的功率输入非线性电容元件, 变换成 f_3 的上边带而输出。这时是稳定的, 可以取得 f_3/f_1 的增益。

2.1.2 下边带方式 如表 15.2(2) 所示, 设 $W_p > 0$, 则 $W_2 < 0$, $W_1 < 0$ 。由于在频率 f_1 时发生再生作用, 所以是不稳定的。这时, 根据外负载的大小而发生放大或振荡。关于这时的增益等的定量表示, 请参阅本编第 4.4 节。

如上所述, 曼利·罗式只是表示各边带波间的功率分配关系。因此, 要想了解放大增益, 频带宽度等特性, 如下章所述, 必须具体给出非线性电容的形状以及与此相连接的外电路。

2.2 用小信号理论进行分析

上节中, 对于非线性电容施加了两种基本频率的功率, 其中频率 f_1 的功率 W_1 表示需要放大的输入信号功率, 频率 f_p 的功率 W_p 表示放大所必需的能源的振荡功率, 以此说明了曼利·罗式的物理意义。这时, 假定可以成立

$$W_p \gg W_1 \quad (15.5)$$

的关系, 就能在使用非线性电容的变换器或放大器的输入输出功率之间出现线性, 所以能简单地进行分析。本节要利用这种分析方法(即用小信号理论进行分析)介绍参量放大器的理论。

2.2.1 频率 f_p 所激励的非线性电容的特性^[4] 如作为