

半导体手册
第14编



微波电路



科学出版社

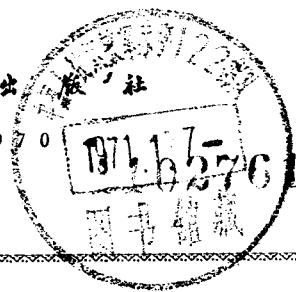
《半导体手册》第14編

微 波 电 路

《半导体手册》翻译组译

科 学 出 版 社

1970



《半导体手册》第14编

微波电路

《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证出字第061号

外文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1970年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1970年11月第一次印刷 印张：4 1/2

字数：98,000

统一书号：15031·276

本社书号：3628·15-7

定价：0.34元

73.67
152
15

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

本书是根据〔日〕半导体手册编委会编《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编。

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，各编重点不一样，仅供读者参考。

原书中主要缺点表现在：有些编的内容尚有形式化的数学推导较多，物理分析较少；有些编在讲解概念和理论分析上有些模糊；有些编在文字和数字上有错误；有些编则为一些资产阶级学术权威和厂商吹嘘、捧场；有些编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，加以删

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)
第二章 微波检波器	(3)
2.1 检波特性	(3)
2.1.1 平方律检波特性	(3)
2.1.2 电流灵敏度的频率特性	(6)
2.2 噪声特性	(9)
2.2.1 热噪声	(9)
2.2.2 散粒效应噪声	(9)
2.2.3 闪变效应噪声	(10)
2.3 温度特性	(11)
2.4 抗烧毁功率特性	(12)
2.5 微波阻抗	(13)
2.6 视频检波	(13)
2.7 检波器晶体二极管的结构	(18)
2.8 微波检波电路的实例	(19)
第三章 变频器	(21)
3.1 变频器的种类	(21)
3.2 变频器的理论	(24)
3.2.1 变频损耗	(24)
3.2.2 变频器的噪声	(30)
3.3 变频器晶体二极管	(32)
3.3.1 半导体的种类与电阻率	(32)
3.3.2 二极管的结构	(34)

3.4	变频器晶体二极管的测试方法	(35)
3.4.1	变频损耗的测量	(35)
3.4.2	噪声温度比的测量	(37)
3.5	接收变频器的特性	(38)
3.5.1	本机振荡功率和偏压的影响	(38)
3.5.2	温度特性	(39)
3.5.3	接收变频器二极管的规格	(40)
3.6	发射变频器	(41)
3.7	变频器的延迟特性	(44)
3.8	变频器电路的实例	(48)
3.8.1	平衡型	(48)
3.8.2	不平衡型	(50)
3.8.3	谐波接收	(51)
第四章	倍频器	(54)
4.1	倍频理论	(54)
4.2	倍频器的噪声	(60)
4.3	倍频器的特性	(62)
4.4	倍频器的实例	(67)
第五章	采用隧道二极管的电路	(74)
5.1	放大器	(74)
5.1.1	隧道二极管的高频特性	(74)
5.1.2	基本电路的稳定条件	(76)
5.1.3	放大器的特性	(79)
5.1.4	分布参数电路	(85)
5.2	振荡器	(88)
5.2.1	振荡器	(88)
5.2.2	隧道二极管的性能指数	(94)
5.3	变频器	(95)
5.4	检波器	(98)

第六章 其他微波电路	(100)
6.1 限幅器.....	(100)
6.2 换向器、调制器和移相器	(102)
6.2.1 换向器和调制器	(102)
6.2.2 移相器	(108)
6.3 自动幅度控制与自动频率控制.....	(110)
6.3.1 自动幅度控制	(110)
6.3.2 自动频率控制	(111)
6.4 微波脉冲的产生和再生.....	(112)
6.5 微波计算机.....	(116)
6.6 半导体元件的其他应用.....	(121)
6.6.1 功率计	(121)
6.6.2 衰减器和调制器	(129)
参考资料	(133)

1102761

第一章 概 述

在通信事业开始利用无线电的初期, 信号检波使用了方铅矿和黄铁矿制的矿石检波器. 发明真空管以后, 就几乎不用了. 在第二次世界大战时期发明了雷达, 由于过去的真空管受极间电容和电子渡越时间等的影响, 在微波波段的检波效率很低, 于是, 又重新使用上述影响较少的矿石检波器作检波器和接收变频器. 以后对用作矿石检波器的半导体和变频器进行理论研究, 发现 Si 和 Ge 半导体比方铅矿等还好, 对 Si 和 Ge 的高提纯技术也取得了很大的进步, 并且改进了变频器的电路和测定方法. 在研究这些问题的过程中, 发明了晶体三极管, 引起了大家对半导体工学的重视, 以后随着晶体三极管技术的发展, 晶体二极管的特性也得到了很大的改善.

目前所能利用的半导体材料, 不仅有 Si 和 Ge, 而且还有 Ga-As、Ga-Sb 之类的金属化合物. 半导体材料的用途非常广泛, 不但应用它的检波特性来制造检波器和变频器, 还应用它的阻抗随电压变化的特性来制造倍频器、限幅器、转向器和调制器. 特别是倍频器, 由于晶体三极管能使振荡输出倍增, 在 4 千兆赫能得到 100 毫瓦以上的倍增输出, 目前已经能够制作全部使用半导体元件的微波电源. 最近发现利用晶体二极管势垒层电容的非线性制成的参量放大器具有低噪声特性, 用它作初级放大器的微波接收机也达到了实用阶段. 其次, 为了提高计算机的运算速度, 还试制了晶体二极管的微波波段参量器计算机. 二极管的工作频率范围也大大扩大. 现在已

经有 75 千兆赫频带用的检波器,此外,把二极管用于倍频器,已成功地产生 37 千兆赫输入的十八次谐波。另外,隧道二极管也能在微波波段作负电阻元件使用,于是用它试制了振荡器、放大器和变频器。用隧道二极管制成的振荡器已成功地产生了 100 千兆赫以上的振荡。这种振荡器的振荡输出虽不算大,例如在 3 千兆赫时为 0.7 毫瓦,在 90 千兆赫时为 2 微瓦,但如采用适当的电路解决了这个问题,其用途一定会显著扩大。此外,用于放大器时,在 55 千兆赫频带也得到了 35 分贝以上的增益。

除上述晶体二极管的应用问题而外,人们还把半导体元件本身用于微波电路上。例如,从前的微波功率计以锰、镍等氧化金属半导体原料制成的热敏电阻,最近,试制了利用霍耳效应的半导体功率计。此外,还在研究利用半导体元件作可变衰减器和调制器。

第二章 微波检波器

2.1 检波特性^[1]

2.1.1 平方律检波特性 用于检波器的晶体二极管的伏安特性曲线的典型例子如图 14.1 所示。这种伏安特性曲线根据扩散原理可以用下式表示:

$$I = I_s(e^{\alpha V} - 1) \quad (14.1)$$

式中 I_s 是在反向偏压状态下由于热而产生的少数载流子所引起的电流(饱和电流), I_s 可以表示为下式:

$$I_s = \left(\frac{qD_p}{L_p n_d} + \frac{qD_n}{L_n n_a} \right) n_i^2 A \quad (14.2)$$

式中 $\alpha = q/kT$, q 是电子电荷, k 是玻耳兹曼常数, T 是绝对温度, D_n 、 D_p 是电子、空穴的

扩散常数, n_i 是本征半导体的电子浓度, n_a 、 n_d 是受主和施主的浓度, A 是接触面积, L_n 、 L_p 是电子、空穴的扩散长度。

α 的理论值是 40 伏⁻¹, 但实际的晶体二极管的 α 值, 由于串联电阻(扩散电阻)等的影响, 要低于这个值。

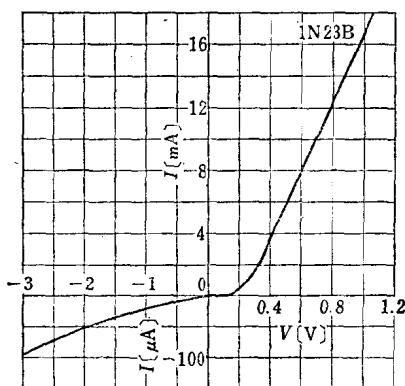


图 14.1 检波器用的晶体二极管的伏安特性曲线

晶体二极管的等效电路可用图 14·2(a) 表示。 L 是触针的电感, C_H 是管座的电容, R_s 是串联电阻(扩散电阻), C 是势垒层电容, R 是势垒层电阻。这些

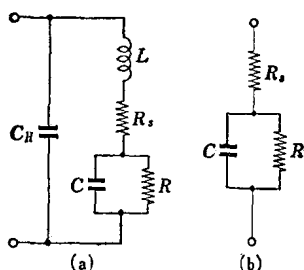


图 14·2 检波器用晶体二极管的等效电路

参量值是: L 为 2—4 毫微亨, C_H 为 0.2—0.4 微微法, R_s 为 10—30 欧, C 和 R 随偏压和输入功率而变化。偏压为零时, 小输入下的 C 值为 0.1—0.5 微微法, R 值为 10—100 千欧。其中 L 和 C_H 可通过外电路的匹配加以消除, 而且与检波特性有关的是 R_s , C 和 R , 所以晶体二极管的等效电路可改绘成图 14·2(b)。

设晶体二极管加上电压 $V_0 \sin \omega t$ 时检波电流为 i , 则加于势垒层的电压为

$$V = V_0 \sin \omega t - i R_s \quad (14.3)$$

设 V_0 和 i 的值非常小, 略去 V_0 的三次以上的项和 i 的二次以上的项, 对周期 T 进行积分, 即可求出 i 值。

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{T} \int_0^T I_s (e^{\alpha V} - 1) dt \\ &\doteq \frac{I_s}{T} \int_0^T \left[1 + \alpha V + \frac{(\alpha V)^2}{2} - 1 \right] dt \\ &\doteq - I_s i R_s \alpha + \frac{I_s}{4} \alpha^2 V_0^2 \end{aligned}$$

$$\therefore i = \frac{\frac{\alpha}{4} V_0^2}{\frac{1}{I_s \alpha} + R_s} \quad (14.4)$$

V_0 值小时,

$$R = \left(\frac{dV}{dI} \right)_0 = \frac{1}{\left(\frac{dI}{dV} \right)_0} = \frac{1}{I_s \alpha} \quad (14.5)$$

式中 $(dV/dI)_0$ 表示偏压为零时的伏安特性曲线的导数。因此,可以改写成:

$$i = \frac{V_0^2}{4} \cdot \frac{\alpha}{R + R_s} \quad (14.6)$$

输入电压小时,检波电流与输入电压的平方成正比,晶体二极管显示平方律检波特性。设图 14.2(b) 的等效电路输入阻抗为 Z , 则被这个电路吸收的功率 P 可用式 (14.8) 表示:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} + R_s \quad (14.7)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{V_0^2}{2} \operatorname{Re} \left(\frac{1}{Z} \right) \\ &= \frac{V_0^2}{2} \cdot \frac{\frac{1}{R} \left(1 + \frac{R_s}{R} \right) + \omega^2 C^2 R_s R^2}{\left(1 + \frac{R_s}{R} \right)^2 + \omega^2 C^2 R_s R^2} \end{aligned} \quad (14.8)$$

式 (14.4) 与式 (14.8) 之比, 叫做检波器用的晶体二极管的电流灵敏度, 可用 β 表示:

$$\beta = \frac{i}{P} = \frac{\alpha}{2 \left(1 + \frac{R_s}{R} \right)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\omega^2 C^2 R_s R^2}{R + R_s}} \quad (14.9)$$

实际晶体二极管的输入功率与检波电流的关系, 如图 14.3 所示, 输入功率在 10 微瓦以下时, 大体为线性(平方律检波), 但输入功率大于 10 微瓦时, 式 (14.9) 的 R 和 C 值就和小输入时的值不同, 所以, β 值也不同于小输入时的值, 检波特性就不再属于平方律特性。

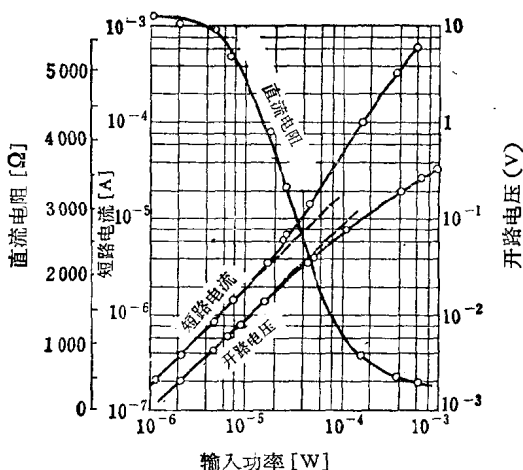


图 14.3 晶体二极管的输入功率与检波特性、直流电阻的关系

如图 14.4 所示,使用微波功率计和已知衰减量的衰减器来测定匹配的晶体二极管输入功率和这时的检波电流,就可以求出电流灵敏度。此外,如图 14.5(a) 所示,使用晶体二极管作驻波测定器的检波器,测定反射板的驻波比,按照图 14.5(b) 那样在对数方格纸上绘出 $\sin 2\pi x/\lambda$ 与 $i/i_{\text{最大值}}$ 的关系曲线,就可以从这个曲线的斜率求出平方律检波特性。图中 λ 是管内波长, x 为检波电流最小点的距离, $i_{\text{最大值}}$ 是检波电流的最大值, i 是 x 点的检波电流。

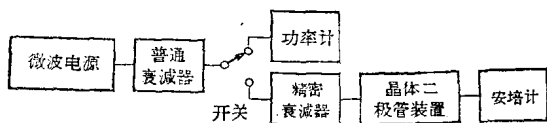
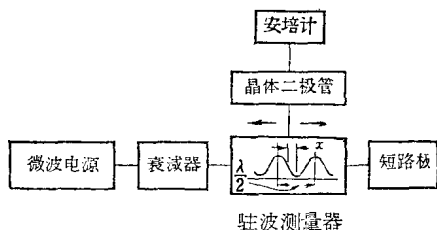
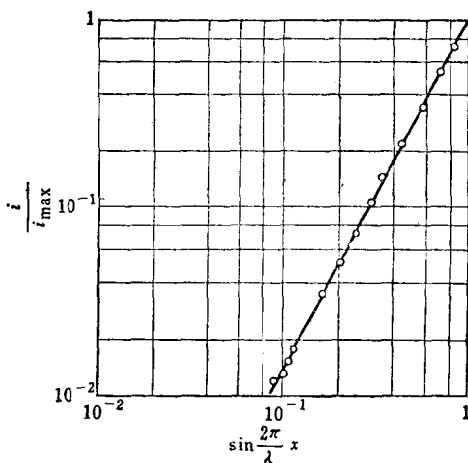


图 14.4 电流灵敏度测量电路

2.1.2 电流灵敏度的频率特性 从式(14.9)可以看出,由于 ωC 的影响,电流灵敏度 β 在高频时的值小于低频时的



(a)



(b)

图 14.5 检波特性测量法

值。高频时,不仅由于势垒层电容的影响,而且由于空穴储存效应,而使电流灵敏度降低。例如就 pn 结二极管来说,如加上正向电压,则空穴作为少数载流子向 n 型一边,电子作为少数载流子向 P 型一边注入。这些空穴和电子分别与 n 型一边的电子或 P 型一边的空穴复合,按指数函数减少。设注入载流子浓度为 Δn_0 , t 秒后的载流子浓度为 Δn , 则

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (14.10)$$

τ 是注入载流子的寿命。锗的 τ 值为 10—100 微秒，硅的 τ 值为 50—500 微秒左右。如在注入载流子减少到可以忽略不计的程度以前，加上反向电压，则储存在 n 型一边及 p 型一边的空穴和电子将被吸回到原来的 p 型一边及 n 型一边。由于这种关系，如图 14·6 所示，反向电流不立即成为饱和电流 I_s ，而通过远远大于饱和电流 I_s 的反向电流。因此，检波电流比无空穴储存效应时的检波电流要小得很多。为了减少这种影响，现在检波器用的二极管都是用载流子寿命短而且电阻率低的半导体制成。

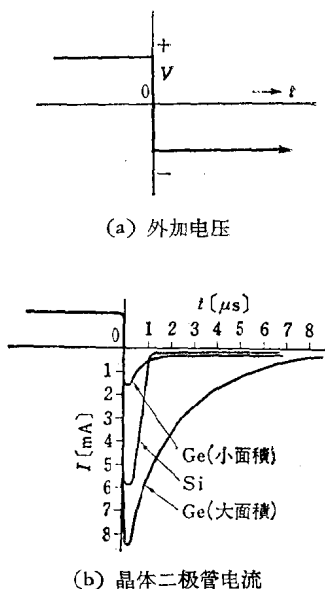


图 14·6 空穴储存效应特性曲线

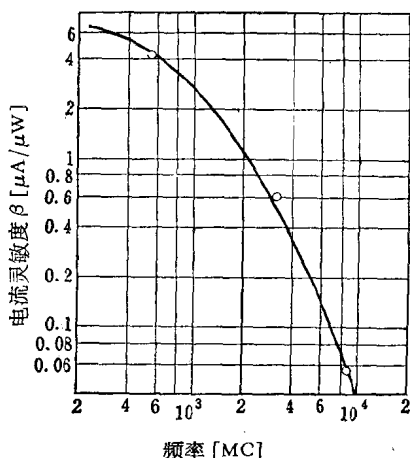


图 14·7 电流灵敏度的频率特性曲线

实际晶体二极管的电流灵敏度，如图 14·7 所示，频率在 10 千兆赫以上时还不到频率在 1 千兆赫以下时的电流灵敏度值的 1/10。