



无线电计量测试丛书

15

高频、微波半导体器件 的计量测试

曹余录 董新 韦强 编著



中国计量出版社

无线电计量测试丛书 15

高频、微波半导体器件的 计量测试

曹余录 ~~董~~ 新 韦 强 编著

中国计量出版社

新登（京）字024号

内 容 提 要

本书是无线电计量测试丛书第十五分册，专门论述高频、微波半导体器件的计量测试问题。全书共七章，内容包括：晶体管直流参数计量测试；晶体管频率特性和T型等效电路参数计量测试；晶体管开关参数计量测试；晶体管网络参数计量测试；低噪声晶体管噪声系数和功率增益计量测试；高频、微波功率晶体管功率增益和输出功率计量测试；微波二极管参数计量测试。

本书可供具有中等以上文化程度从事无线电计量测试的科技人员及大专院校有关专业师生阅读，也可作为计量测试人员的培训教材。

无线电计量测试丛书 15

高频、微波半导体器件的计量测试

曹余录 董 新 韦 强 编著

责任编辑 刘宝兰

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 787×1092/32 印张 5.376 字数118千字

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数 1—4 000

ISBN 7-5026-0562-2/TB·415

定价 4.20 元

无线电计量测试丛书编委会

主 编: 汤世贤

副主编: 周清一 吴鸿适 张世箕 席德熊

编 委: (以姓氏笔划为序)

王义举 王立吉 戈锦初 古乐天

汤世贤 刘全宝 李世雄 吴鸿适

张世箕 张 伦 陈成仁 周清一

郭允晟 夏虎林 倪伟清 诸维明

席德熊 黄志洵

本分册责任编辑: 李锦林 孙凤金

无线电计量测试丛书

1. 无线电计量测试概论
2. 高频、微波信号源及其稳定
3. 低频电压的计量测试
4. 高频电压的计量测试
5. 高频、微波功率的计量测试
6. 高频、微波场强与干扰的计量测试
7. 高频、微波噪声的计量测试
8. 失真与调制参数的计量测试
9. 脉冲参数与时域测量技术
10. 高频集总参数阻抗的计量测试
11. 微波阻抗与反射的计量测试
12. 数据域测试
13. 网络参数的计量测试
14. 高频、微波介质的计量测试
15. 高频、微波半导体器件的计量测试
16. 高频、微波相移的计量测试
17. 高频、微波衰减的计量测试

前 言

无线电计量测试丛书是根据中国计量出版社关于按学科分类组编计量测试丛书的总体设想和统一安排，在中国计量测试学会的高度重视和实际支持下，由本编委会邀请作者、组织编写和审订的。其目的是比较系统地传播无线电计量测试科学技术知识，促进电子学与无线电技术的发展，以适应科技进步和社会主义现代化建设的需要。

本丛书主要论述高频和微波电磁量的计量测试问题，一般不包括直流和低频的内容。丛书第一分册为“概论”，其余各分册分别阐述各主要参量及数据域的测试。“丛书”各分册既保持了相互联系，又是一本专题论著，具有独立性，因此将按成书的先后陆续出版。

本丛书的主要读者对象，是具有中等以上文化程度的无线电计量测试工作者、有关专业的科学技术人员、大专院校师生、计量管理干部，也可作为计量人员的培训用书。

无线电计量测试丛书编委会

编 者 的 话

半导体器件的计量测试在器件的研制和应用中占有重要地位。通过各种工艺制成的器件，最终检验其性能的优劣就是通过对器件的参数测试来完成的。在器件的应用中也必须提供器件的特性参数才能进行要求的电路设计，才能实施电路结构和装调。

随着半导体器件的迅速发展，品种愈来愈多，频率愈来愈高，功率也愈来愈大。因此，对器件参数的计量测试提出更高的要求。半导体器件计量测试的首要任务就是能准确地反映出器件的性能。

由于半导体器件的品种很多，计量测试所涉及到的范围很广，有关内容繁多。根据“无线电计量测试丛书”的要求，本书仅对频率高于30 MHz的高频和微波低噪声晶体管、功率晶体管以及微波二极管等分立半导体器件的电参数计量测试进行介绍。

我国国家标准 GB 4587—84“双极型晶体管测试方法”中对于双极型晶体管的参数测量方法已做出规定。为了满足广大半导体器件计量测试工作者的要求，本书除对实现 GB 4587—84所规定的方法和测量中的问题做了具体说明外，还对那些虽然在 GB 4587—84中没有规定而目前国内广泛使用的以及那些还没有来得及制定而实际工作中已采用的方法也做了详细介绍。对于国家标准中那些方法简单并已十分成熟（或已有商品仪器出售）的方法，本书不再重复。

书中提及的晶体管，从载流子导电机理上可分为两种

类型，一种是双极型晶体管，即通常称之为晶体管；另一种是单极型晶体管，通常称为场效应晶体管。对于场效应晶体管，本书中主要指微波砷化镓场效应晶体管(GaAsFET)。

由于半导体器件多数是有源器件，它们的电参数往往与工作状态（偏置条件）、源和负载条件有密切关系，因此，人们各自测量的结果往往出现差异，难以统一，更难判断哪些结果更真实地反映器件的性能。因此，要求在给出器件参数的同时，必须注明测量条件，包括环境条件、工作状态、源和负载情况以及测量系统的构成等，以便于比较。

本书在编写过程中，先后得到艾平凡、汪显尧、李树民、王世林、李高庆等先生提供资料和帮助，在此表示感谢。

本书由丛书编委会特约李锦林研究员和孙风金副研究员作了详细的审阅，最后由席德熊高级工程师审定。他们对本书提出了许多宝贵的建议和修改意见，谨此一并致谢。

作者

1991年7月

目 录

第一章 晶体管直流参数计量测试	(1)
第一节 双极型晶体管直流参数的测量方法	(2)
第二节 场效应晶体管直流参数的测量方法	(6)
第二章 晶体管频率特性和 T 型等效电路参数计量 测试	(10)
第一节 晶体管频率特性及其测量方法	(11)
第二节 其他频率特性参数测量方法	(24)
第三节 微波砷化镓场效应晶体管的频率特性参数的 确定	(28)
第四节 双极型晶体管 T 型等效电路参数的 测量方法	(29)
第三章 晶体管开关参数计量测试	(39)
第一节 晶体管的开关参数	(41)
第二节 开关参数 t_{on} 和 t_{off} 的测量方法	(42)
第四章 晶体管网络参数计量测试	(47)
第一节 晶体管 Y 参数的测量方法	(51)
第二节 用测量线测量晶体管 S 参数的方法	(61)
第三节 国标 GB 4587—84 规定的方法	(72)
第四节 矢量网络分析仪方法	(77)
第五章 低噪声晶体管噪声系数和功率增益 计量测试	(81)
第一节 晶体管的噪声系数	(81)
第二节 晶体管的功率增益	(89)
第三节 噪声系数、功率增益和源阻抗的关系	(93)
第四节 噪声系数的测量原理	(96)

第五节	晶体管噪声系数和功率增益的测量方法	(100)
第六节	源阻抗的测量	(119)
第七节	噪声系数、功率增益、源阻抗综合 测量系统	(121)
第八节	Q03型晶体管噪声系数计量装置简介	(122)
第六章	高频、微波功率晶体管功率增益和输出 功率计量测试	(127)
第一节	400 MHz 以下功率增益和输出功率 测量	(130)
第二节	1 GHz 以上功率增益和输出功率 测量	(137)
第三节	线性功率输出和互调特性的测量方法	(143)
第四节	动态源阻抗和负载阻抗的测量	(148)
第五节	Q02A、Q02B型微波功率晶体管功率增益 K _F 标准计量装置	(149)
第七章	微波二极管参数计量测试	(151)
第一节	检波二极管参数的测量方法	(151)
第二节	混频二极管参数的测量方法	(153)
第三节	变容二极管参数的测量方法	(159)

第一章 晶体管直流参数 计量测试

晶体管直流参数的测量方法已经很成熟，专用的测量仪器已商品化。因此，本书中对晶体管直流参数的测量方法不作详细介绍，仅从器件应用的角度介绍一些简单而且直观的方法。

市售晶体管特性曲线图示意仪已有多种，它们可以被认为是晶体管直流参数综合测试仪。在生产半导体器件的工厂车间里、在学校或研究所的实验室里都屡见不鲜。采用它可以直接观测晶体管（包括二极管）的输入特性、输出特性以及特性转移，利用已校准过的刻度旋钮和步进开关的读数也可以较准确地测量器件的直流参数。

读者可能已经很熟悉了，小功率双极型晶体管最常用的直流参数有：反向截止电流、反向击穿电压、正向工作电压、电流放大系数和饱和压降等。对于功率双极型晶体管还需特别注意最大电流、最大电压、最大耗散功率等。

对于场效应晶体管（又称单极型晶体管）来说，也有反向截止电流、反向击穿电压，还有饱和漏极电流、栅源截止电压、跨导等。

上述各参数，多数都可以直接从晶体管特性曲线图示意仪上测得。以下将简单地介绍各参数的测量原理电路以及如何从晶体管特性曲线图示意仪上直接测量的方法。

第一节 双极型晶体管直流

参数的测量方法

一、反向击穿电压和反向截止电流的测量

$V_{(BR)EBO}$ ——发射极结反向击穿电压。

$V_{(BR)CBO}$ ——集电极结反向击穿电压。

对于共发射极电路，当基极处于三种不同状态时，对应有三种反向击穿电压。

$V_{(BR)CEC}$ ——基极开路时，集电极与发射极间的击穿电压。

$V_{(BR)CES}$ ——基极与发射极短路时，集电极与发射极间的击穿电压。

$V_{(BR)CER}$ ——基极与发射极间接电阻 R 时，集电极与发射极间的击穿电压。

因为击穿电压是在规定的截止电流下测量的，所以，对应五个反向击穿电压有五个截止电流 I_{EBO} 、 I_{CBO} 、 I_{CEO} 、 I_{CES} 、 I_{CER} 。上述参数的基本测量电路如图 1-1 所示。

基本测量步骤：

$V_{(BR)EBO}$ ：按图 1-1(a)，逐渐提高反向电源电压，直到电流表指示的电流值为规定值时的电压值为基极与发射极间的击穿电压。

$V_{(BR)CBO}$ ：按图 1-1(b)，逐渐提高反向电源电压，直到电流表指示的电流值为规定值时的电压值为基极与集电极间的击穿电压。

$V_{(BR)CEO}$ 、 $V_{(BR)CES}$ 、 $V_{(BR)CER}$ ：按图 1-1(c)，分别在基极和发射极之间开路、短路与接有电阻时，逐渐提高反向

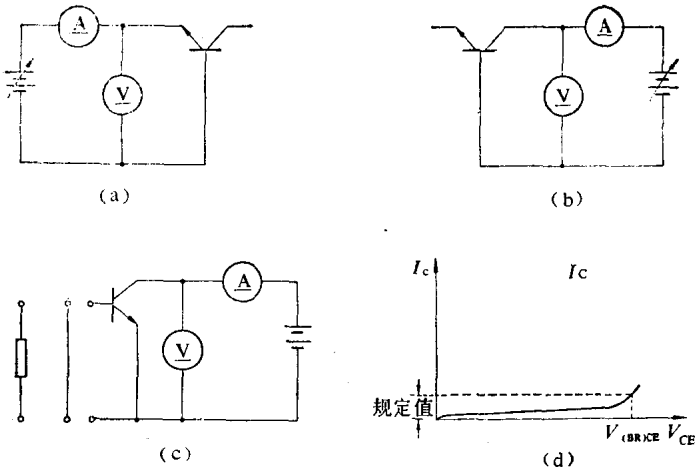


图 1-1 双极型晶体管击穿电压测量原理电路图

电源电压，直到电表指示的电流值为规定值时的电压值分别为开路、短路与接电阻时的反向击穿电压。

反向截止电流的测量也采用图 1-1 的原理电路，只是与测量击穿电压相反，在保持反向电源电压为规定值时，读取此时电流表中的电流值即为各自的反向截止电流。

二、共发射极电流放大系数 h_{FE} 的测量

测量共发射极电流放大系数 h_{FE} 的原理电路如图 1-2 所示。

根据电流放大系数的定义：

$$h_{FE} = \frac{I_c}{I_b} \quad (1-1)$$

测量的主要步骤是：按规定加上集电极电压 V_{CE} ，再逐

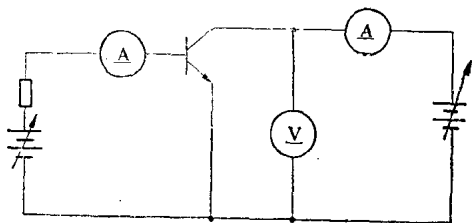


图 1-2 测量共发射极电流放大系数 h_{FE} 的原理电路

渐加大基极电压 V_{EB} ，使集电极电路中的电流表指示出规定的集电极电流 I_c ，根据这时基极电流表指示值 I_b ，按式(1-1)可求出 h_{FE} 值。

三、集电极饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 的测量

测量集电极饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 的原理电路与测量 h_{FE} 的原理电路相同。测量饱和压降时，要规定饱和度，即 I_c/I_b 的比值为规定值，通常规定为 3~5。例如规定饱和度 $I_c/I_b = 5$ ，当要求 $I_c = 10 \text{ mA}$ 时， I_b 为 2 mA。

测量集电极饱和压降的基本步骤是：调节基极电压，使基极回路中的电流表指示为规定值 I_b 。调节集电极电压，使集电极回路中的电流指示为规定值 I_c 。读取此时集电极与发射极间的电压表指示值即为集电极饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 值。

四、由晶体管特性曲线图

示仪测量直流参数

图 1-3 给出在晶体管特性曲线图示仪上显示的双极型晶体管输出特性曲线。

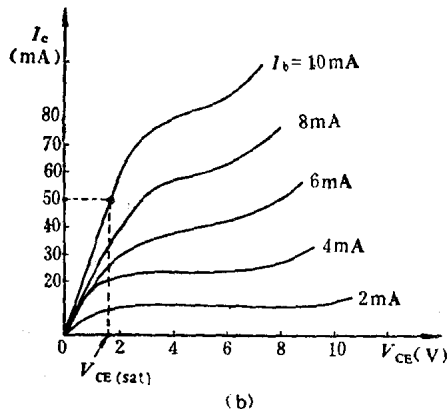
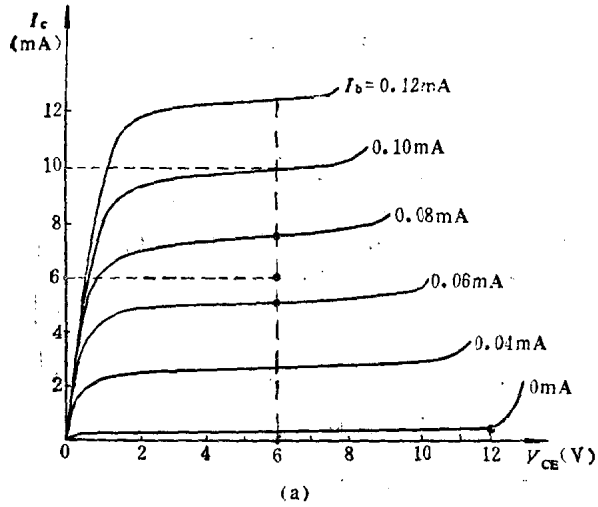


图 1-3 双极型晶体管的输出特性曲线

由图 1-3 的输出特性曲线可以测量出最常用的双极型晶体管的直流参数。

1. 击穿电压 $V_{BR,CEO}$: 从图 1-3 (a) 的双极型晶体管

的输出特性曲线族中，取 $I_b = 0$ 的一根，按规定的 I_o 值（例如取 $I_o = 10 \mu\text{A}$ ），求得 $V_{CE}(\text{V})$ 轴上的电压为 12V ，即 $V_{(BR)CEO} = 12 \text{V}$ 。

2. 共发射极直流电流放大系数 h_{FE} ：按规范规定的集电极电压和电流（例如取 $V_{CE} = 6 \text{V}$ ， $I_o = 6 \text{mA}$ ）下的 h_{FE} 。在图 1-3 (a) 中，取 $I_b = 0.06 \text{mA}$ 和 0.08mA 两根曲线，在 $V_{CE} = 6 \text{V}$ 时对应的 I_o 分别为 5mA 和 7.6mA 。根据 h_{FE}

$$\text{的定义, } h_{FE} = \frac{\Delta I_o}{\Delta I_b} = \frac{2.6}{0.02} = 130.$$

3. 集电极饱和压降 $V_{CE(sat)}$ ：如图 1-3 (b) 所示，按规范取饱和度和 I_o 值（例如取饱和度为 5， $I_o = 50 \text{mA}$ ）。测量时旋动基极注入的步进开关使 I_b 值变大，取 $I_b = 10 \text{mA}$ 的一根曲线与 $I_o = 50 \text{mA}$ 的直线相交，则交点对应于电压 V_{CE} 轴的电压值即为 $I_o = 50 \text{mA}$ 、饱和度 $I_o/I_b = 5$ 时的集电极饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 。

第二节 场效应晶体管直流

参数的测量方法

场效应晶体管的主要直流参数有栅极和漏极间的泄漏电流 I_{GDO} 、饱和漏极电流 $I_{DSS(sat)}$ 、栅极和源极间截止电压 $V_{GS(off)}$ 、跨导 g_m 等。

一、栅极-漏极间泄漏电流 I_{GDO} 的测量

定义：源极开路时，栅极-漏极间加固定反向电压时的电流。

测量原理电路如图 1-4 所示。

二、饱和漏极电流 $I_{DS(sat)}$ 的测量

定义：当栅极和源极短路时，漏极和源极间加规定电压时的漏极电流。

测量的原理电路如图 1-5 所示。

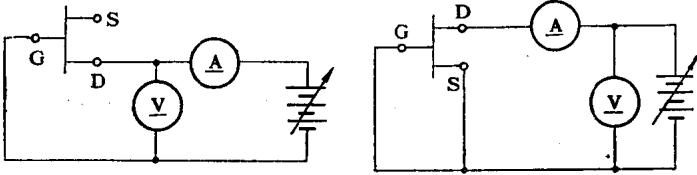


图 1-4 栅-漏间泄漏电流 I_{GD0} 测量的原理电路

图 1-5 饱和漏极电流 $I_{DS(sat)}$ 测量的原理电路

三、栅源截止电压 $V_{GS(off)}$ 的测量

定义：源极-漏极电压 V_{DS} 为某一定值时，使源极-漏极电流为规定值时的栅偏压。

测量的原理电路如图 1-6 所示。

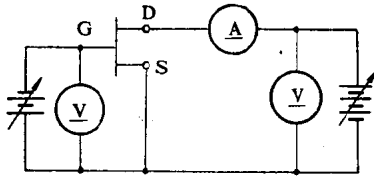


图 1-6 栅源截止电压 $V_{GS(off)}$ 测量的原理电路

四、跨导 g_m 的测量

定义：源极-漏极电压 V_{DS} 为某一定值时，漏极电流随