电子基础元器件检测

主　编　章俊华　苏　明

副主编　陈世国　龚洪宾　马建华　刘万松

编　委：阮方鸣　赵瑞平　王　珩　何二宝

王　义　李金辉　王学杰　龚国刚

潘齐凤　周廷荣　李明贵　肖文君

戎小凤　方　润　钟健思　张　宁

西南交通大学出版社

·成　都·

内容简介

本书由贵州省机械电子产品质量监督检验院、贵州师范大学、中国振华电子集团有限公司、贵州省电子学会组织长期工作在一线的教学科研和产品开发及检测人员编写。主要内容包括检测技术基础，电阻器、电容器、电感器、二极管、三极管、场效应管、继电器、压电器件、小型变压器、熔断器等基础电子元器件的基础知识、常规检测和特殊检测。介绍了如何运用通用性电测仪器和仪表，对各类电子元器件进行检测，同时也介绍了一些新型电子元器件的特殊检测方法。

本书适用于大中专相关专业师生、电子工程技术人员、家用电器和电子设备等行业的维修人员、电子爱好者。

图书在版编目（CIP）数据

电子基础元器件检测/ 章俊华，苏明主编. —成都：西南交通大学出版社，2014.8
ISBN 978-7-5643-3420-8

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①章… ②苏… Ⅲ. ①电子元件－检测②电子器件－检测 Ⅳ. ①TN606

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 197768 号

电子基础元器件检测
主编　章俊华　苏 明
*
责任编辑　黄淑文
封面设计　严春艳
西南交通大学出版社出版发行
四川省成都市金牛区交大路 146 号　邮政编码：610031　发行部电话：028-87600564
http: //www. xnjdcbs. com
成都蓉军广告印务有限责任公司印刷
*
成品尺寸：185 mm × 260 mm　　印张：17.75
字数：443 千字
2014 年 8 月第 1 版　　2014 年 8 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-5643-3420-8
定价：39.00 元

图书如有印装质量问题　本社负责退换
版权所有　盗版必究　举报电话：028-87600562

序　言

随着电子信息产业的快速发展，作为电子信息产业基础的电子元器件产业其发展也异常迅速。截止到 2012 年 9 月，我国规模以上电子元器件制造企业达到 4 938 家，行业总资产达到 8 705.8 亿元。近年来，中国电子工业持续高速增长，带动了电子元器件产业的强劲发展。中国已经成为扬声器、铝电解电容器、显像管、印制电路板、半导体分立器件等电子元器件的世界生产基地。

电子元器件是电子技术的基本元素，是电子电路的重要组成部分。任何一种电子装置都由这些电子元器件合理、和谐、巧妙地组合而成的。可以说，没有高质量的电子元器件，就没有高性能的电子产品。电子元器件正进入以新型电子元器件为主体的新一代元器件时代，它将逐渐取代传统元器件。电子元器件由原来只为适应整机的小型化及其新工艺要求为主的特性进行改进，变成以满足数字技术、微电子技术发展所提出的特性要求为主，而且是成套的产业化发展阶段。客观地说，不了解这些元器件的性能和规格，就难以适应当代电子技术的发展。学会正确选用和检测电子元器件，是掌握电子技术基本知识和技能的重要内容之一。

《电子基础元器件检测》一书由贵州省机械电子产品质量监督检验院、贵州师范大学、中国振华电子集团有限公司、贵州省电子学会组织长期工作在一线的教学科研和产品开发及检测人员编写，编者有厚实的理论功底和丰富的实践经验，全书主要介绍如何运用通用性电测仪器和仪表，对各类电子元器件进行检测，同时也介绍了一些新型电子元器件的特殊检测方法。该书的特点是通俗易懂、新颖实用，能使读者在最短的时间内对各种电子元器件有全面的了解，掌握各种电子元器件的检测方法，并能根据具体设计方案选定所需的元器件。《电子基础元器件检测》为读者提供了一些简单、实用的电子元器件检测实例，使读者能够快速掌握各种电子元器件的检测方法。该书内容丰富、实用，可供大中专相关专业师生、电子工程技术人员、家用电器和电子设备等行业的维修人员、电子爱好者等阅读参考。

借该书出版之际，我由衷的希望参编单位进一步加强高校、科研院所、企业、社会团体的合作与交流，为贵州省社会经济的发展做出更大的贡献。

贵 州 省 政 协　副 主 席
贵州师范大学副校长、教授　谢时芝

2014 年 1 月 9 日

前　言

电子元器件处于电子信息产业链上游，是通信、计算机及网络、数字音/视频等系统和终端产品发展的基础，对电子信息产业的发展起着至关重要的作用。

近年来，中国电子工业的持续高速增长带动了电子元器件产业的强劲发展。我国许多门类的电子元器件产量已稳居全球第一位，电子元器件行业在国际市场上占据了重要的地位。我国已经成为扬声器、铝电解电容器、显像管、印制电路板、半导体分立器件等电子元器件的世界生产基地。

本书的编写目的主要是为大中专相关专业师生、电子工程技术人员、家用电器和电子设备等行业的维修人员、电子爱好者等提供一本实用的参考资料。本书内容涵盖电阻器、电容器、电感器、二极管、三极管、场效应管、继电器、压电器件、小型变压器、熔断器等基础电子元器件，对它们的型号命名方法、主要参数、常用器件、新型器件等方面进行了介绍，并结合检测实例，着重介绍了如何运用通用性电测仪器和仪表对各类电子元器件进行检测。在注重常用器件和常规检测的同时，对新型器件和特殊检测也进行了介绍，以期提供一些新型电子元器件及其检测的发展趋势和新技术。本书提供的资料直观、实用，内容通俗、简洁。

本书在写作过程中，参考和引用了大量文献和仪器仪表公司的技术资料，在此对提供资料的单位和个人表示感谢。

参与本书编写的作者及其完成的章节如下：

章俊华、苏明、龚洪宾、刘万松、马建华：全书统稿；

苏明、王珩、何二宝：第 1 章；

王义、龚国刚、张宁：第 2 章；

阮方鸣、潘齐凤：第 3 章；

陈世国、李金辉：第 4 章；

刘万松、周廷荣、李明贵：第 5 章；

肖文君、周廷荣、李明贵：第 6 章、第 7 章；

方润、赵瑞平、钟健思：第 8 章；

方润、王学杰：第 9 章；

戎小凤、潘齐凤：第 10 章；

戎小凤、龚国刚、李明贵：第 11 章；

戎小凤、龚国刚：第 12 章。

本书的写作过程中，得到了贵州省机械电子产品质量监督检验院、贵州师范大学、中国振华电子集团有限公司、贵州省电子学会等单位的大力支持，在此一并表示真诚的感谢！最后对参与本书编辑排版的贵州师范大学刘雪飞、程桂仙老师以及硕士研究生徐伟等表示感谢！

本书虽然经过编写组多次讨论和修改，数易其稿，但由于学识水平所限，不足之处在所难免，恳请专家、学者和同仁提出宝贵意见。

《电子基础元器件检测》编写组

2014 年元月

目　录

第 1 章　检测技术基础 ……1

1.1　检测的基础知识 ……1

1.2　国家法定计量单位 ……2

1.3　抽样技术基础 ……8

1.4　数据处理 ……16

1.5　测量误差 ……18

1.6　测量不确定度 ……25

1.7　量值溯源 ……31

1.8　电子基础元器件的检测方法 ……35

第 2 章　电阻器的检测 ……39

2.1　电阻器的基础知识 ……39

2.2　电阻器检测技术 ……46

2.3　电阻器检测实例 ……50

第 3 章　电容器的检测 ……52

3.1　电容器的基础知识 ……52

3.2　电容器的型号和命名 ……52

3.3　电容器的容量标示 ……53

3.4　电容器的分类 ……54

3.5　电容器的主要参数 ……55

3.6　常见电容器介绍 ……56

3.7　固定电容器的主要特性 ……59

3.8　电容器的检测 ……60

第 4 章　电感器的检测 ……71

4.1　电感器的基础知识 ……71

4.2　新型电感器 ……74

4.3　电感器的检测 ……75

第 5 章　二极管的检测 ……80

5.1　二极管的基础知识 ……80

5.2　新型二极管 ……86

5.3　二极管的检测 ……95

第 6 章　三极管的检测 ……120

6.1　三极管的基础知识 ……120

6.2　新型三极管 ……122

6.3　三极管的检测 ……131

第 7 章　场效应管的检测 ……181

7.1　场效应管的基础知识 ……181

7.2　新型场效应晶体管 ……183

7.3　场效应晶体管的检测 ……199

第 8 章　继电器的检测 ……223

8.1　继电器的基础知识 ……223

8.2　新型继电器 ……226

8.3　继电器的检测 ……228

第 9 章　压电器件的检测 ……238

9.1　压电器件的基础知识 ……238

9.2　压电器件的常规检测 ……244

9.3　压电器件的特殊检测 ……246

第 10 章　小型变压器的检测……248

10.1　小型变压器的基础知识……248

10.2　变压器的检测……255

第 11 章　小型熔断器的检测……259

11.1　小型熔断器的基础知识……259

11.2　熔断器主要技术指标 ……263

11.3　小型熔断器的检测技术……264

第 12 章　抑制器的检测 ……268

12.1　抑制器的基础知识 ……268

12.2　综合浪涌保护系统组合……271

12.3　抑制器的检测技术 ……273

参考文献 ……275

第 5 章　二极管的检测

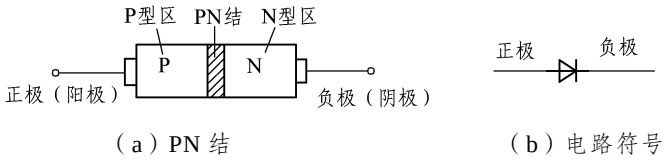
5.1　二极管的基础知识

5.1.1　二极管的基本概念

二极管也叫半导体二极管，是半导体器件中最基本的一种器件，它是由一个 PN 结、两根电极引线以及外壳封装构成的。二极管的最大特点是：单向导电性。其主要作用包括：稳压、整流、检波、开关、光/电转换等。二极管的规格品种很多，按所用半导体材料的不同，可以分为锗二极管、硅二极管、砷化镓二极管；按结构工艺不同，可分为点接触型二极管和面接触型二极管；按用途分为整流二极管、开关二极管、稳压二极管、检波二极管、发光二极管、钳位二极管等；按频率分，有普通二极管和快恢复二极管等；按引脚结构分，有二引线型、圆柱形（玻封或塑封）和小型塑封型。贴片式二极管有短引线和无引线两种。

5.1.2　二极管的工作原理

二极管是由一个 PN 结、两根电极引线以及外壳封装构成的，P 型区引出线为二极管正极，N 型区引出线为负极，当我们把二极管的 P 型区引出线接电源正极、N 型区引出线接电源负极时，PN 结呈现低电阻，有正向电流，称为导体；反之，PN 结呈现高电阻，有极小的反向电流，称为截止。二极管的 PN 结及电路符号如图 5.1 所示。



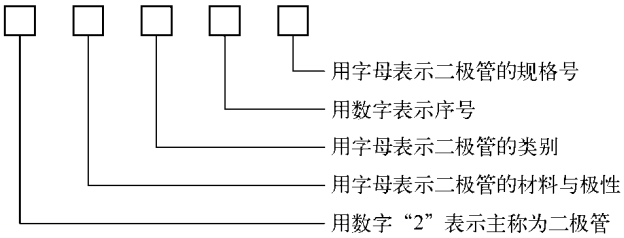
（a）PN 结　　（b）电路符号

图 5.1　二极管的 PN 结及电路符号

5.1.3　晶体管的型号和命名

1．国产普通二极管的型号命名法

依据国家标准 GB 249—89《半导体分立器件型号命名方法》，国产二极管的型号命名分为五个部分，如下所示。



五个部分的具体意义如下。

第一部分：用数字 2 表示半导体器件有效电极数目。

第二部分：用大写字母 A、B、C、D 表示半导体器件的材料和极性。A 表示 N 型锗材料；B 表示 P 型锗材料；C 表示 N 型硅材料，D 表示 P 型硅材料。

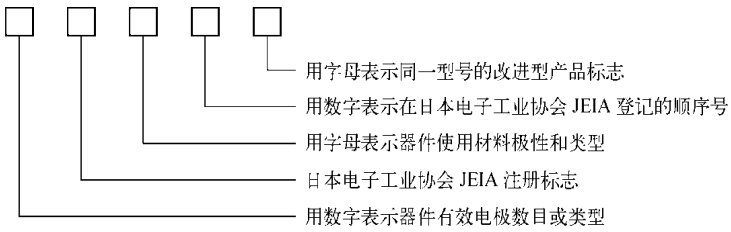
第三部分：用汉语拼音字母表示半导体器件的类型。P 表示小信号管（普通管）；V 表示混频检波管（微波管）；W 表示电压调整管和电压基准管（稳压管）；C 表示变容管（参量管）；Z 表示整流管；L 表示整流堆；S 表示隧道管；N 表示阻尼管；U 表示光电器件；K 表示开关管。

第四部分：用数字表示序号。

第五部分：用汉语拼音字母表示规格号。

2. 日本产晶体管型号命名法

日本生产的晶体管型号命名由五至七部分组成，通常只用到前五个部分，如下所示。



五个部分的具体意义如下。

第一部分：用数字表示器件有效电极数目或类型。0 表示光电（即光敏）二极管三极管及上述器件的组合管；1 表示二极管；2 表示三极或具有两个 PN 结的其他器件；3 表示具有四个有效电极或具有三个 PN 结的其他器件，依此类推。

第二部分：日本电子工业协会 JEIA 注册标志。S 表示已在日本电子工业协会 JEIA 注册登记的半导体分立器件。

第三部分：用字母表示器件使用材料极性和类型。A-PNP 型高频管；B-PNP 型低频管；C-NPN 型高频管；D-NPN 型低频管；F-P 控制极可控硅；G-N 控制极可控硅；H-N 基极单结晶体管；J-P 沟道场效应管；K-N 沟道场效应管；M-双向可控硅。

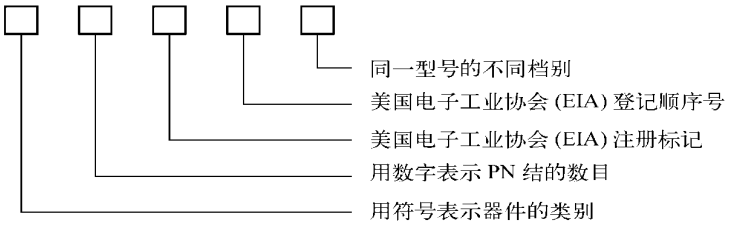
第四部分：用数字表示在日本电子工业协会 JEIA 登记的顺序号。两位以上的整数从 11 开始，表示在日本电子工业协会 JEIA 登记的顺序号；不同公司性能相同的器件可以使用同一顺序号；数字越大，越是近期产品。

第五部分：用字母表示同一型号的改进型产品标志。A、B、C、D、E、F 表示这一器件

是原型号产品的改进产品。

3. 美国产晶体管型号命名法

美国生产的晶体管型号命名由五部分组成，如下所示。



五个部分的具体意义如下。

第一部分：用符号表示器件用途的类型。JAN 表示军级、JANTX 表示特军级、JANTXV 表示超特军级、JANS 表示宇航级、（无）表示非军用品。

第二部分：用数字表示 PN 结数目。1 表示二极管；2 表示三极管；3 表示三个 PN 结器件；*n* 表示 *n* 个 PN 结器件。

第三部分：美国电子工业协会（EIA）注册标志。N 表示该器件已在美国电子工业协会（EIA）注册登记。

第四部分：美国电子工业协会登记顺序号。多位数字表示该器件在美国电子工业协会登记的顺序号。

第五部分：用字母表示器件分档。A、B、C、D 表示同一型号器件的不同档别。如：JAN2N3251A 表示 PNP 硅高频小功率开关三极管，JAN 表示军级；2 表示三极管；N 表示 EIA 注册标志；3251 表示 EIA 登记顺序号；A 表示 2N3251A 档。

5.1.4 二极管的主要参数

（1）额定正向工作电流：额定正向工作电流是指二极管长期连续工作时允许通过的最大正向电流值。因为电流通过二极管时会使管芯发热，温度上升，温度超过最大允许限度时，就会使管芯发热而损坏，所以，二极管使用中不要超过其额定正向工作电流值。

（2）最大反向工作电压 U_R：指工作时加在二极管两端的反向电压不得超过此值，否则二极管可能被击穿。

（3）反向电流 I_R：指在室温条件下，在二极管两端加上规定的反向电压时，流过管子的反向电流。通常希望 I_R 值越小越好。反向电流越小，说明二极管的单向导电性越好。

（4）最高工作频率 f_M：最高工作频率是指二极管在正常工作条件下的最高频率，主要取决于 PN 结结电容的大小。结电容越大，则二极管允许的最高工作频率越低。

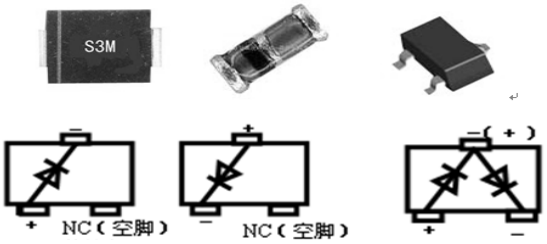
在选择二极管时必须要考虑这些参数，切勿使工作时的电压、电流、功率超过手册中规定的极限值，并根据设计原则选取一定的余量，以免烧坏管子。

5.1.5 常用的二极管

1. 整流二极管

整流二极管是一种用于将交流电转变为直流电的半导体器件，具有明显的单向导电性，可用半导体锗或硅等材料制造。硅整流二极管的击穿电压高，反向漏电流小，高温性能良好。这种器件的结面积较大，能通过较大的电流（可达上千安），但工作频率不高，一般在几十千赫以下。整流二极管主要用于各种低频半波整流电路，如果要达到全波整流则需连成整流桥使用。选用整流二极管时，主要应考虑其最大整流电流、最大反向工作电流、截止频率及反向恢复时间等参数。常用的型号有 2CZ 型、2DZ 型等，还有用于高压和高频整流电路的高压整流堆，如 2CGL 型、DH26 型、2CL51 型等。整流二极管的外壳封装常采用金属壳封装、塑料封装和玻璃封装三种形式。整流二极管实物如图 5.2 所示。

（a）通孔式



（b）贴片式

图 5.2　整流二极管实物图

2. 检波二极管

检波二极管为点接触型，其结电容小，一般为锗管。检波二极管的主要作用是把高频信号中的低频信号检出，广泛应用于半导体收音机、收录机、电视机及通信等设备的小信号电路中，其工作频率较高，处理信号幅度较弱。检波二极管常采用玻璃外壳封装，主要型号有 2AP 型和 1N4148（国外型号）等，其电路符号及实物如图 5.3 和图 5.4 所示。

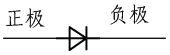


图 5.3　检波二极管电路符号

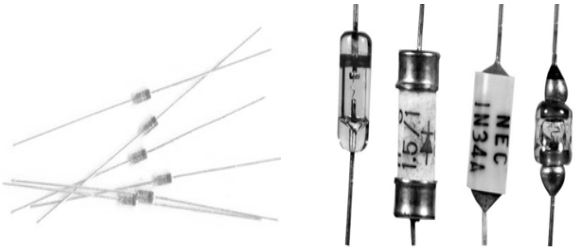


图 5.4　检波二极管实物图

3. 开关二极管

在脉冲数字电路中，用于接通和关断电路的二极管叫做开关二极管，它的特点是反向恢复时间短，能满足高频和超高频应用的需要。开关二极管有接触型、平面型和扩散台面型几种，一般 $I_F < 500$ mA 的硅开关二极管，多采用全密封环氧树脂或陶瓷片状封装，引脚较长的一端为正极。开关二极管的电路符号及实物如图 5.5 和图 5.6 所示。

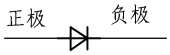


图 5.5　开关二极管电路符号

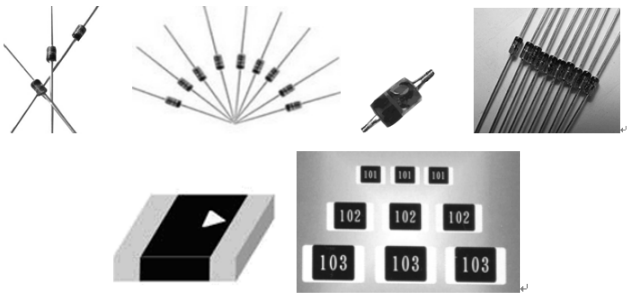


图 5.6　开关二极管实物图

4. 稳压二极管

稳压二极管也叫稳压管，它是用特殊工艺制造的面结型硅半导体二极管，其特点是工作于反向击穿区，实现稳压；其被反向击穿后，当外加电压减小或消失后，PN 结能自动恢复而不至于损坏。稳压管主要用于电路的稳压环节和直流电源电路中，常用的有 2CW 型和 2DW 型。稳压二极管的电路符号及实物如图 5.7 及图 5.8 所示。

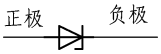


图 5.7　稳压二极管电路符号

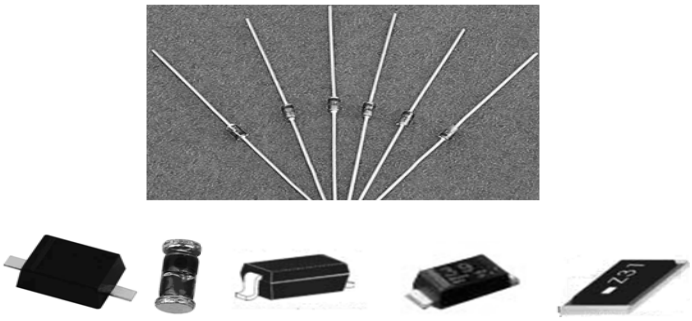
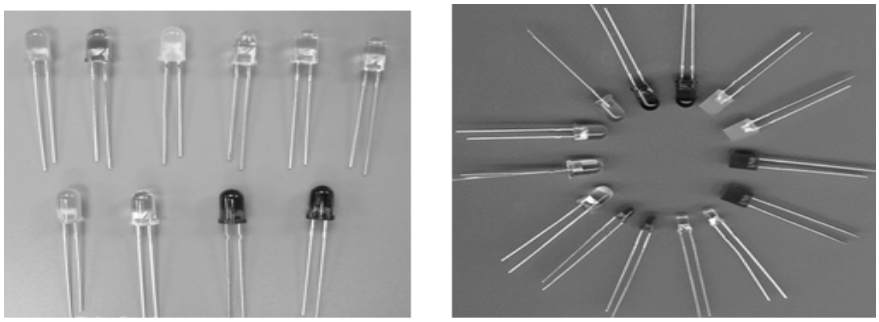


图 5.8　稳压二极管实物图

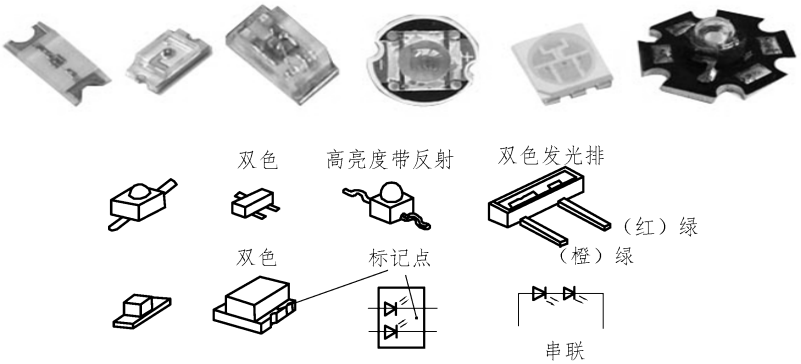
5. 发光二极管

发光二极管（LED）是除了具有普通二极管的单向导电特性之外，还可以将电能转化为光能的器件。发光二极管外加正向电压时，它处于导通状态，当正向电流流过管芯时，发光二极管就会发光，将电能转化成光能。常见的发光二极管的发光颜色有红色、黄色、绿色、橙色、蓝色、白色等。发光二极管的电路符号和实物如图 5.9 及图 5.10 所示。

图 5.9　发光二极管电路符号



（a）通孔式



（b）贴片式

图 5.10　发光二极管实物图

6. 光敏二极管

光敏二极管是当受到光照射时反向电阻会随之变化的二极管。随着光照的增强，光敏二极管反向电阻由大到小变化，常用作光电传感器件。光敏二极管的电路符号和实物如图 5.11 及图 5.12 所示。

图 5.11　光敏二极管电路符号

（a）通孔式　　（b）贴片式

图 5.12　光敏二极管实物图

5.2 新型二极管

1. 变容二极管

变容二极管又称可变电抗二极管，是一种利用 PN 结电容（主要是 PN 结势垒电容）与其反向偏置电压 V_R 的依赖关系及原理制成的二极管，其电容值对应用在该半导体二极管器件两端电极上的电压很敏感，其电路符号等效结构和实物如图 5.13 ~ 图 5.15 所示。

图 5.13　变容二极管电路符号

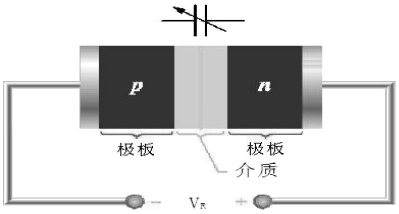


图 5.14　变容二极管等效结构图

图 5.15　贴片变容二极管实物图

变容二极管属于反偏压二极管，改变其 PN 结上的反向偏压，即可改变 PN 结电容量。其反向偏压 V_R 与结电容 C_T 之间的关系是非线性的，但总体上来说，反向偏压增加，电容减少；反向偏压减少，电容增加，如图 5.16 所示。变容二极管通常在高频调谐、通信等电路中作可变电容器使用。其主要电学参数通常有：零偏电容 C_{T0}、零偏优值 Q_0、反向击穿电压 V_{BR}、反向漏电流 I_R、中心反向偏压 V_{RC}、标称电容 C_T、电容变化范围 ΔC_T（以皮法为单位）以及截止频率 f 等。

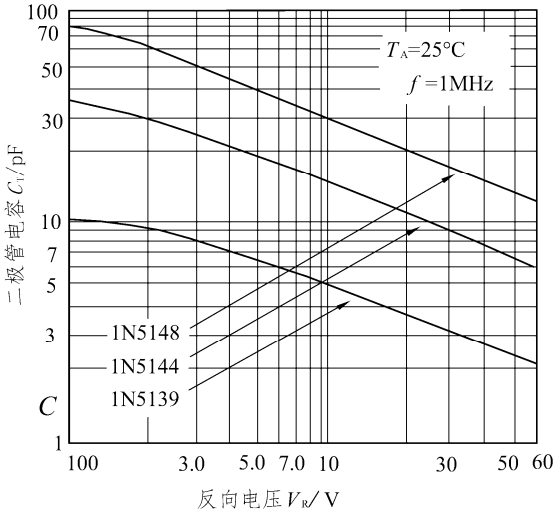


图 5.16　变容二极管的 C_T-V_R 特性

变容二极管是特殊二极管的一种。当外加正向偏压时，从 P 区向耗尽区注入空穴，从 N 区向耗尽区注入电子，分别与 PN 结两侧的电子和空穴产生复合，使 PN 结耗尽区变窄，有大量电流产生，此时则主要由空穴和电子的注入而产生扩散电容效应；当外加反向偏压时，P 区从耗尽区抽走空穴，N 区从耗尽区抽走电子，致使 PN 结的耗尽区变宽，此时则主要由耗尽区内空穴和电子被抽走而产生耗尽层电容效应。但因加正向偏压时 PN 结的正向电流会较大，会有较大的功率耗散产生，且变容效应（扩散电容）不显著，所以在电路应用中一般均采用变容二极管反向偏压配置。

变容二极管是根据所提供的电压变化而改变结电容的半导体器件。也就是说，可作为可变电容器，也称为压控变容器，可以在自动频率控制、扫描振荡、锁相环、高频调谐、通信等电路中作可变电容器使用。如应用于 FM 调谐器、TV 调谐器等电路中，如图 5.17 所示。

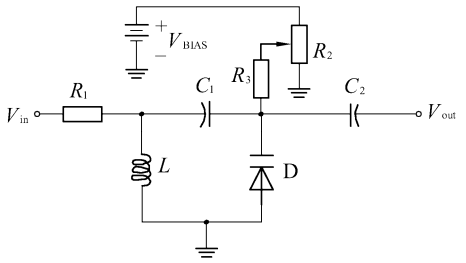


图 5.17　变容二极管作用于调谐电路示例

变容二极管的封装外形主要有玻璃外壳封装（简称玻封）、玻璃钝化封装（简称玻钝）、塑料封装（简称塑封）、金属气密性封装（简称金封）、陶瓷气密性封装（简称瓷封）和以上封装形式的无引线表面贴封装等多种封装形式。

变容二极管具有与衬底材料电阻率有关的串联电阻。对于不同用途，应选用不同 C_T-V_R 特性的变容二极管，如有专用于谐振电路调谐的电调变容二极管、适用于参放的参放变容二极管，以及用于固体功率源中倍频、移相的功率阶跃变容二极管等。

变容二极管的主要参数如表 5.1 所示。

表 5.1　变容二极管的主要参数

型号	电容量(工作电压)		电容比率	工作频率
	最小值	最大值		
303B	3～5 p(25 V)	18 p(3 V)	>6	1 000 MHz
2AC1	2 p(25 V)	27 p(3 V)	>7	50 MHz
2CC1	3.6 p(25 V)	20 p(3 V)	4~6	50 MHz
2CB14	3 p(25 V)	18～30 p(3 V)	5~7	50 MHz
2CC-32	2.5 p(25 V)	25 p(3 V)	4.5	>800 MHz
ISV-101	12 p(10 V)	32 p(2.5 V)	2.4	100 MHz
AM-109	30 p(9 V)	460 p(1 V)	15	AM
BB-112	17 p(6 V)	12 p(3 V)	1.8	AM
ISV-149	30 p(8 V)	540 p(1 V)	18	AM
S-153	2.3 p(9 V)	16 p(2 V)	7	>600 MHz
MV-209	11 p(9 V)	33 p(1.5 V)	3	UHF
KV-1236	30 p(8 V)	540 p(1 V)	20	AM
KV-1310	43 p(8 V)	93 p(2 V)	2.3	>100 MHz

续表 5.1

型号	电容量(工作电压)		电容比率	工作频率
	最小值	最大值		
IS149	30 p(8 V)	540 p(1 V)	18	AM
S208	2.7 p(9 V)	17 p(4 V)	>4.5	>900 MHz
MV2105	6 p(9 V)	22 p(4 V)	2.5	UHF
DB300	6.8 p(25 V)	18 p(3 V)	1.8	50 MHz
BB112	10 p(25 V)	180 p(3 V)	>16	AM

2. 恒流二极管

恒流二极管，又称电流调整二极管或稳流二极管。近年来问世的半导体恒流器件，都能在较宽的电压范围内输出恒定的电流，即动态阻抗非常高，通常具有恒流性能好、价格较低、使用简便等优点，已被广泛应用于恒流源、稳压源、放大器以及电子仪器的恒流电路中。

恒流二极管通常属于两端结型场效应恒流器件，其伏安特性如图 5.18 所示。

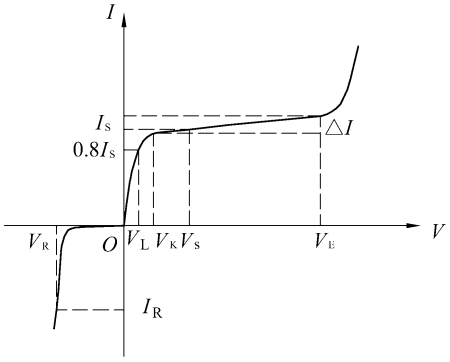


图 5.18　恒流二极管的伏安特性

恒流二极管的主要参数如下：

I_s'——恒定电流，是在工作电压（V_s）下通过器件的电流，参数范围一般为 0.1 ~ 60 mA。

I_R——最大反向电流，是恒流二极管允许通过的最大反向电流。

V_L——恒定启动电压（极限电压），电流值为 0.8 I_s 时对应的电压。

V_K——恒流区最小工作电压，即工作电压区的最小值。

V_E——恒流区最大工作电压，即工作电压区的最大值。

ΔI——恒流电流变化量，即工作电压区对应的恒定电流最大变化量。

V_K ~ V_E——工作电压区。

V_R——最大反向电压，通过结的反向电流等于规定值 I_R 时的反向电压。

K_c——电流调整精度，表征恒定电流值受电压变化影响的参数。定义为恒定电流变化量与工作电压区之比，单位为微安/伏（μA/V），计算公式为

$$K_c = \frac{\Delta I}{V_E - V_K} \tag{5-1}$$

a_{is}——温度系数，在两个规定温度之间，恒定电流的变化率与这两个温度差之比，是表征恒定电流值受温度影响的参数。

P_z——恒流二极管在恒流区的功耗 $P_Z = I_s \times V$，V 是恒流区工作电压。最大功耗 $P_{Zm} = I_s \times V_E$。

Z_H——动态电阻，在规定的工作电压（V_s）和规定的交流信号下，器件两端产生的交流电压与交流电流之比。

恒流二极管在正向工作时有一个恒流区，在此区域内 I_s 不随 V 的变化而变化；而其反向

工作特性则近似于普通二极管的正向特性。主要参数有：恒定电流（I_s）、工作电压（V_S）、最大反向电流（I_R）、恒定启动电压（极限电压）（V_L）、恒流区最小工作电压（V_K）恒流区最大工作电压（V_E）、恒流电流变化量（ΔI）、工作电压区（$V_K \sim V_E$）、最大反向电压（V_R）、电流调整精度（K_c）、温度系数（a_{is}）、功耗（P_Z）、动态电阻（Z_H）等。

3. PIN 二极管

PIN 二极管是在 P 型半导体和 N 型半导体材料之间制作一层较薄的低掺杂的本征（Intrinsic）半导体层，形成 P-I-N 型结构，其实物和结构图分别如图 5.19 和图 5.20 所示。

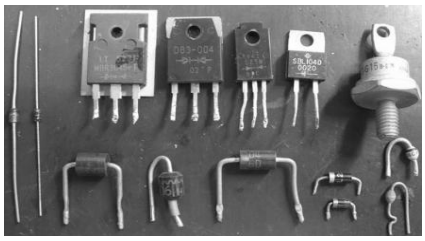


图 5.19　PIN 二极管实物图

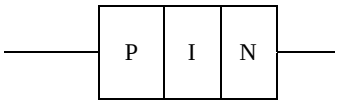


图 5.20　PIN 二极管结构

由于 P 区和 N 区之间有本征层的存在，PIN 二极管与普通 PN 结二极管在电特性方面有较大的不同。PIN 二极管主要包括 PIN 光电二极管和 PIN 开关二极管两大类。

PIN 开关二极管开关利用 PIN 管在直流正向、反向偏压下呈现近似导通或断开的阻抗特性，实现对控制信号通道开关的作用。PIN 二极管的直流伏安特性和普通 PN 结二极管类似，但是在高频甚至微波频段却有很大的差别。PIN 二极管的 I 层总电荷主要由偏置电流产生，与高频信号的电流瞬时值关系不明显，由此对高频信号呈现线性电阻的特性，其阻值由直流偏置决定。正偏时阻值小，接近于短路；反偏时阻值大，接近于开路。由此，PIN 二极对高频信号不产生非线性整流作用，这是和一般二极管的根本区别。PIN 二极比较适合于作高频和微波控制器件，常被应用于高频开关（或微波开关）、移相、调制、限幅等电路中。

当 PIN 二极管加负电压（或零偏压）时，PIN 二极管等效于一个电容加一个电阻；加正电压时，PIN 二极管等效于一个小电阻。图 5.21 给出了 PIN 二极管在正向导通时的电荷分布情况。

图 5.22 表示 PIN 二极管反向关断时的电流波形。

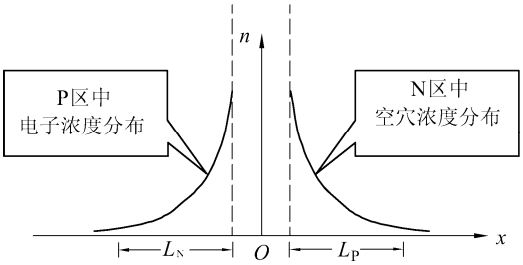


图 5.21　PIN 二极管正向导通时的电荷分布

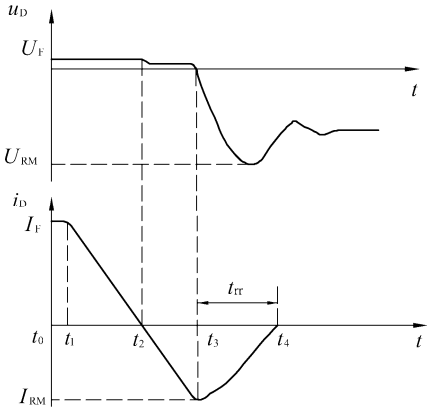


图 5.22　PIN 二极管反向关断时电流波形

PIN 二极管的关断过程可分为两个阶段：从 $t = t_0$ 到 $t = t_1$，二极管处于低阻抗状态，其电压近似为 0；在 $t = t_1$ 时刻，二极管中 I 区域边缘的剩余电荷变为 0，二极管开始呈现高阻抗状态。

一般情况下，t_{rr}、I_{rr} 及测试条件 di/dt、I_{RM} 均在器件的产品手册上列出。根据测试条件，τ_{rr} 可由下式获得

$$\tau_{rr} = (t_{rr} - I_{rr}/a)/\ln 4 \tag{5-2}$$

其中，$a = -\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$。

根据图 5.22 所示的反向电流波形，q_M 在 $t \leqslant t_1$ 阶段的表达式为

$$q_M(t) = a\tau_a\left[t_0 + \tau_a - t - \tau_a \exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right)\right] \tag{5-3}$$

当 $t = t_1$ 时，$i(t_1) = -I_{rr} = -q_M(t_1)/t$，$\tau_a$ 可由下式解出

$$I_{rr} = a(\tau_a - \tau_{rr})\left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right)\right] \tag{5-4}$$

然后参数 t 可由 τ_a、t 及 τ_{rr} 的关系式算出。

从以上的讨论可以看出，该模型的参数可以方便地从产品手册中得到：首先计算 τ_{rr}，再解得 τ_a，最后求参数 t。

PIN 二极管的主要参数为：

（1）插入损耗：开关在导通时衰减不为零，称为插入损耗。

（2）隔离度：开关在断开时其衰减也非无穷大，称为隔离度。

（3）开关时间：由于电荷的存储效应，PIN 管的通断和断通都需要一个过程，这个过程所需时间。

（4）承受功率：在给定的工作条件下，PIN 二极管能够承受的最大输入功率。

（5）电压驻波系数：仅反映端口输入、输出匹配情况。

（6）谐波：PIN 二极管也具有非线性，因而会产生谐波，谐波落在使用频带内则会引起干扰。BAR81W 的测试参数如表 5.2 所示。

表 5.2　BAR81W 的测试参数

型号	反向电压 V_R/V	正向电压 V_F/V	正向电流 I_F/mA	反向电流 I_R/nA	电容 C_T/pF	正向电阻 R_F/Ω	电阻测试条件 I_F/mA	功耗 P_d/mW
BAR81W	30	1.0	20	100	1.0	1.0	5	100

4. 瞬变电压抑制二极管

瞬变电压抑制二极管简称 TVSD。在规定的应用条件下，当瞬变电压抑制二极管承受一个高能量的瞬时过压脉冲时，其工作阻抗能迅速降至很低的导通值，允许大电流通过，并将电压钳制到预定水平，从而有效地保护电路中的精密元器件免受损坏。瞬变电压抑制二极管

有能力承受的反向瞬变脉冲功率可达数千瓦，其钳位响应时间约为 1 ps（10^{-12}s）。它允许的正向浪涌电流，在 T_A = (25 ± 5)°C，t = 10 ms 半正弦波信号的条件下，可达 50 ~ 200 A。瞬态电压抑制二极管是电子电路中最重要的电子元器件之一，已广泛地应用于通信、计算机、家用电器、电动玩具、节能照明等领域。单向瞬变电压抑制二极管只在反方向吸收瞬时大脉冲功率，而双向瞬变电压抑制二极管可在正反两个方向吸收瞬时大脉冲功率。双向瞬变电压抑制二极管常用于交流电路，而单向瞬变电压抑制二极管一般用于直流电路。

单向瞬变电压抑制二极管的典型伏安特性如图 5.23 所示。从 *V-I* 特性可以看出，它与普通二极管极为相似，反向击穿的拐点 $V_{(BR)}$ 为近似直角硬击穿。从击穿拐点 $V_{(BR)}$到 V_C 值所对应的曲线段表明，当有瞬时过压脉冲施加时，器件的电流急骤增加，而电压增加较少。在 I_P 电流和 1 ms 指数波的条件下，可将电压钳位到 V_C 以下水平。

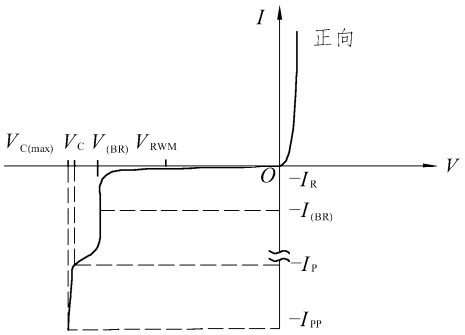


图 5.23　单向瞬态电压抑制二极管的典型 *V-I* 特性

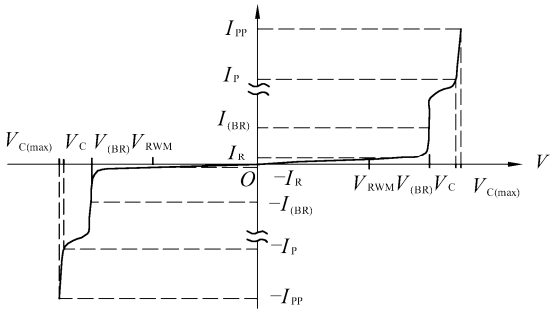


图 5.24　双向瞬变电压抑制二极管的典型 *V-I* 特性

双向瞬变电压抑制二极管的 *V-I* 特性曲线如图 5.24 所示，如同两只单向 TVS 背靠背组合，其正反两个方向都具有相同的雪崩击穿特性和钳位特性，正反两面击穿电压的对称关系为：0.9≤ $V_{(BR)(正)}/V_{(BR)(反)}$≤1.1，一旦加在它两端的干扰电压超过击穿电压 $V_{(BR)}$就会立刻被抑制掉，因此，双向瞬变电压抑制二极管在交流回路中应用十分方便。

瞬态电压抑制二极管主要性能参数的最大额定值见表 5.3。

表 5.3　TVSD 主要性能参数的最大额定值

型号	P_{PR}①/W	P_R②/mV	I_P/A	I_{FSM}/A	T_{OP}/°C	T_{stg}/°C
	T_A = 25 °C	T_A = 25 °C	t_P = 1 ms，t_r = 10 μs	t = 10 ms，半正弦		
BSY5907	1500	1000	150	200	− 55 ~ 150	− 55 ~ 175
BSY5643	1500	1000	38.5	200	− 55 ~ 150	− 55 ~ 175
BSY5646	1500	1000	29.0	200	− 55 ~ 150	− 55 ~ 175
BSY5648	1500	1000	24.0	200	− 55 ~ 150	− 55 ~ 175
BSY5649	1500	1000	22.2	200	− 55 ~ 150	− 55 ~ 175
BSY5650	1500	1000	20.4	200	− 55 ~ 150	− 55 ~ 175

① t_P = 1 ms、t_r = 10 μs。② 当 T_A>25 °C 时，器件按 8 mW/°C 的速率线性降额。

瞬态电压抑制二极管的主要电性能参数的电特性如表 5.4 所示（T_A = 25 °C，除非另有规定）。

表 5.4　TVSD 主要性能参数的电特性表

型号	$V_{(BR)}$/V			$I_{(BR)}$/mA	I_{Rmax} /μA	V_{RWM} /V	$V_{C(max)}$ /V	I_{Pmax} /A	I_{ZMmax} /mA
	min	nom	max						
BSY5907	6.00	6.38	6.75	1.0	300	5.0	9.5	150	140
BSY5643	24.3	27	29.7	1.0	5.0	21.8	39.1	38.5	35
BSY5646	32.4	36	39.6	1.0	5.0	29.1	52.0	29.0	26
BSY5648	38.7	43	47.3	1.0	5.0	34.8	61.9	24.0	22
BSY5649	42.3	47	51.7	1.0	5.0	38.1	67.8	22.2	20
BSY5650	45.9	51	56.1	1.0	5.0	41.3	73.5	20.4	18

瞬变电压抑制二极管的电性能参数可以分最大额定值参数和电特性参数两大类。一般来说，最大额定值参数是产品设计保证类参数，大多不能进行直接测试，必须通过试验装置进行验证，而且试验验证通常都带有一定的破坏性。电特性参数则可以通过电特性参数的测试仪器、设备，在规定的测试条件（如测试方法、测试电流/电压/波形、测试持续时间/间隔时间、测试温度、环境温度、环境湿度等）下进行直接测试。

5. 碳化硅二极管

碳化硅（SiC）材料是当今半导体业界公认的一种重要的未来电子器件材料，是 21 世纪最具广阔发展潜力的新型半导体材料，如图 5.25 所示。促进碳化硅二极管发展的重要因素之一是碳化硅二极管具有优良的高电压、大功率和高温工作性能；另一个重要因素是硅（Si）材料在电子行业的开发应用已长达 60 年以上，以硅晶体作为基片的二极管性能和能力研究已基本完整。

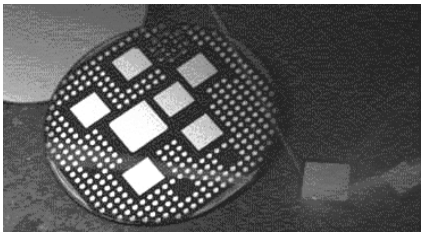


图 5.25　SiC 晶片上的各种尺寸芯片图

硅（Si）和碳化硅（SiC）以及其他半导体材料在电气特性和物理特性上有很多相同之处，但也存在很大不同（见表 5.5）。

表 5.5　几种重要半导体材料（常温晶体）的基本性能比较

材料 / 特性	硅 Si	锗 Ge	碳化硅 SiC	砷化镓 GaAs
原子序数	14	32	14/6	31/33
原子量	28.09	72.59	40.10	144.63
熔点/°C	1410	937.4	2500（升华）	1238
沸点/°C	2355	2830		
比重（在 25°C 时）/(g/cm^3)	2.33	5.32		5.32
晶体结构	金刚石	金刚石	金刚石	闪锌矿
晶格常数/Å	5.43	5.66		5.65
禁带宽度/eV	1.12	0.67	3.3	1.43
临界电场/(V/μm)	30	8	300	50
热导率/(W/cm・K)	1.50	0.6	5.0	0.50

实际上，碳化硅并不是一种最近才发现的新材料，它的颗粒状物料俗名叫金刚砂，常被用作研磨料、切割料和耐热材料而为人们所熟知。关于碳化硅的第一份文献报告是来自于1842 年瑞典人之手，表 5.6 简要介绍了碳化硅材料研究应用的发展经历。碳化硅晶体实际上是原子的复合体，而不是简单的单晶体。预计未来数十年内，碳化硅器件会取得突破性的研究发展。碳化硅的物理特性取决于晶体中的碳硅原子比例和排列结构，最普通和最典型的是6 方晶系的金刚大石结构，可简要分为 6H、4H 和 3C 等数类碳化硅。

表 5.6　碳化硅（SiC）材料的简要发展历程

年代	主 要 事 件
1905 年	第一次在陨石中发现碳化硅
1907 年	第一只碳化硅发光二极管诞生
1955 年	理论和技术上取得重大突破，LELY 提出生长高品质碳化硅晶体概念，从此 SiC 作为重要的电子材料进入大量研究
1958 年	在波士顿召开第一次国际性碳化硅的学术交流会议
1978 年	首次出现采用 LELY 改进技术的碳化硅晶粒提纯生长方法
1987 年至今	以 CREE 的研究成果为基础，建立了首条碳化硅生产线，供应商开始提供商品化的碳化硅基片

SiC 可称之为宽禁带半导体材料，其器件物理特性与硅器件有很大不同：① 大约 10 倍的电场强度；② 大约高 3 倍的热导率；③ 大约宽 3 倍禁带宽度；④ 大约高 1 倍的饱和漂移速度等。

理论分析预测，碳化硅二极管的最高工作温度可达 500 °C（甚至可能会更高），而硅二极管的现实最高工作温度一般是 125 °C 或 150 °C（最高工作结温一般取 175 °C）。另外，碳化硅的导热率达 5W/cm・K，超过了铜的导热率，是硅的导热率（1.5 W/cm・K）的 3 倍多。碳化硅二极管工作时产生的热量更易于快速传递，这无疑对二极管电性能的充分发挥更为有利，是大功率二极管和高温工作二极管十分理想的主体材料。

当前，最高电压为 4.5 kV 的碳化硅二极管已经报道开发成功并应用于实践。亦已有 SiC 光控二极管的灵敏度比 Si 同类器件高 4 个数量级的文献报道。但这些目前多属于实验室样品，真正具有商业价值并能有一定生产量供应的大功率碳化硅二极管仍然很少。最主要原因是 SiC 材料的质量仍不够理想，生产设备昂贵，生产工艺的制约因素很多，生产成品率低，产品成本太高。SiC 器件和 Si 器件的性能主要差异参见表 5.7。

表 5.7　Si 二极管与 SiC 二极管的性能差异比较

材料性能	Si 器件	SiC 器件
电流密度/(A/cm^2)	30	100 ~ 300（可达 500）
最高工作温度/°C	150	300 ~ 500
最高工作结温度/°C	175	>500
器件耐压	x	$5x$ ~ $10x$
通态损耗	x	$x/4$ ~ $x/10$
开关损耗	x	$x/10$ ~ $x/100$

6. 隧道二极管

隧道效应是 1958 年日本江崎玲於奈在研究重掺杂锗 PN 结时发现的，故隧道二极管也称为江崎二极管，由重掺杂的 P^+区和 N^+区形成 PN 结的二极管，即可构成隧道二极管。当重掺杂时，N^+区半导体的费米能级进入了导带，P^+区半导体的费米能级进入了价带。在没有外加电压的热平衡状态时，N^+区和 P^+区的费米能级应相等。N^+区导带底比 P^+区价带顶还低，因此，在 N^+区的导带和 P^+区的价带中出现具有相同能量的量子态。在重掺杂情况下，杂质浓度大，势垒区很薄，由于量子力学的隧道效应，N^+区导带的电子可能穿过禁带，到 P^+区价带，P^+区价带电子也可能穿过禁带到 N^+区导带，从而有可能产生隧道电流。随着长度越短，电子穿过隧道的概率越大，隧道效应产生的电流就越显著。

要发生隧道效应必须具备以下三个条件：

① 费米能级位于导带和满带内；

② 空间电荷层宽度必须很窄（0.01 μm 以下）；

③ 半导体 P^+型区和 N^+型区中的空穴和电子在同一能级上有交叠的可能性。

隧道二极管是在极低正向电压下具有负电阻的半导体二极管，以隧道效应产生的电流为主要电流分量，其伏安特性如图 5.26 所示。

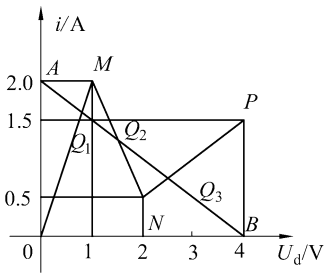


图 5.26　隧道二极管伏安特性

曲线中最大电流点 *M*，称为峰点；最小电流点 *N*，称为谷点，当在隧道二极管上加正电压时，通过隧道二极管的电流将先随电压的增加而很快变大，但在电压达到某一值后，忽而变小，小到一定值后又急剧变大。

隧道二极管是一种多数载流子器件，不受少数载流子存储的影响，也不受漂移传输时间的限制。因此，隧道二极管具有开关特性好、速度快、工作频率高、功耗小和噪声低等特点；但是热稳定性较差，可用于微波混频、检波、振荡等电路中。例如，用于卫星微波设备、超高速开关逻辑电路、触发器和存储电路等。

典型隧道二极管的主要参数如表 5.8 所示。

表 5.8　隧道二极管的主要参数

单位	峰点电压 U_p/mV	谷点电压 U_v/mV	峰点电流 I_p/mA	峰谷电流比	谷点电容 C_v/pF
2BS4A	80	280	4	≥5	10 ~ 15

7. 反向二极管

反向二极管又称为反向隧道二极管，是一种反向导电性高于正向导电性的一种二极管。

反向二极管的核心是一个高掺杂的 PN 结，但结的一边是简并的，另一边是掺杂浓度稍低一点、接近简并而又不完全简并（即 Fermi 能级不进入能带）的半导体。这种二极管在较低工作电压时，其正向电流很小（正向特性与普通的 PN 结相似，是少数载流子的扩散电流，不出现隧道电流），而反向电流很大（是隧道电流）。

因为 PN 结的隧道击穿电压比其正向导通电压还低，故这种二极管的伏安特性曲线，在较小电压范围内与普通 PN 结二极管的恰好相反，因而称为反向二极管。

8. 异质结二极管

异质结二极管是由两种不同元素或不同成分材料构成二极管的结。在异质结的两边，材料的禁带宽度是不同的。

按照异质结两侧材料的导电类型，异质结可分为同型异质结（PP 结或 NN 结）和异型异质（PN 或 PN）结。但通常形成异质结需要具备以下条件：两种不同的半导体材料有相似的晶体结构、相近的原子间距和热膨胀系数。形成异质结的工艺通常有合金、外延、真空淀积等技术，适宜于制作超高速开关器件、太阳能电池以及半导体激光器等。

因为半导体异质结构能将电子与空穴局限在中间层内，从而，电子与空穴的复合率增加，发光的效率较大；同时改变量子井的宽度亦可以控制发光的频率。现在的半导体发光组件，大都是由异质结构所组成的。半导体异质结构发光组件，较其他发光组件，具有高效率、省电、耐用等优点，因此广泛应用于刹车灯、交通信号灯、户外展示灯等。值得一提的是在 1993 年，日本的科学家研发出蓝色光的半导体组件，使得光的三原色红、绿、蓝，皆可用半导体制作，因此各种颜色都可用半导体发光组件得到，难怪大家预测家庭用的灯泡、日光灯，即将被半导体发光组件所取代。

半导体激光二极管的基本构造，与上述的发光组件极为类似，只不过是激光二极管必须考虑到受激发光（stimulated emission）与共振的条件。使用半导体异质结构，因电子与空穴很容易掉到中间层，因此载流子数目反转（population inversion）较易达成，这是具有受激发光的必要条件，而且电子与空穴因被局限在中间层内，其结合率较大。此外，两旁夹层的折射率与中间层不同，因而可以将光局限在中间层，致使光不会流失，而增加激光强度，因而利用异质结构制作激光二极管，有很大的优点。第一个室温且连续发射的半导体异质结构激光二极管，是在 1970 年由阿法洛夫领导的研究群所制作出来的，克拉姆则在 1963 年发展了有关半导体异质结构雷射的原理。半导体雷射二极管的应用范围相当广泛，如激光唱片、高速光纤通信、激光打印机、激光笔等。

5.3 二极管的检测

二极管检测技术是以几何学、光学、电子学、热学等测量理论为基础，以各种检测测量仪器、设备为手段，以被测二极管性能参数为对象的检验测量技术的简称。从二极管产品的发展来看，任何一项新的二极管用材料技术、生产工艺技术及产品应用技术的出现，必将出现一种新的二极管产品，也将出现一种与新的二极管产品相适应的新的测量方法和仪器。虽然新的二极管需要新的测量方法、测量仪器，但所有的新的测量方法、测量仪器，都是基于经典的测量方法和仪器，经发展改进而成的。因此，经典测量方法和仪器是被逐渐发展了，而不是被取代了。因此，在本节中仍用较多的篇幅阐述经典的二极管测量技术。

二极管产品有不同的频率特性，因而形成了低频、高频、甚高频及微波测量等不同测量方法及仪器。对于一般二极管的电性能参数测量，通常可以分为以下几种：

（1）直流电性能参数的测量，包括电压、电流和功率等；

（2）交流电性能参数的测量，包括频率、频谱、时间、相位等；

（3）电路参数的测量，包括电阻、电感、电容、阻抗和损耗等；

（4）电路特性的测量，包括放大量、衰减、频率特性、噪声系数等。

而在微波频率范围内，由于分布参数的影响，其测量技术发展成一门独特的微波测量技术。早期的研究主要集中于功率、波长和频率、频谱和波形、驻波系数和阻抗、衰减和 Q 值等测量方法及仪器。对于微波二极管的反射特性，由于传输特性比较侧重于幅值方面，因而忽视了对相位的研究。但由于相控阵雷达及其他新技术的出现，在微波测量技术中发展了网络分析技术。特别是超高速脉冲发生器和采样技术的出现，使得时域测量技术进入了微波测量之中，出现了通过快速傅氏变换后得出频域散射参数的时域自动网络分析仪。

集成电路技术的快速发展，使计算机技术及网络技术得到了广泛的应用。除了人们熟悉的频域及时域的测量，又开辟了数据域测量的新领域。诸如逻辑分析仪、计算机测试系统等日益显示出现代电子测量技术的优越性。在市场上出现的新型电子仪器，常常将计算机技术、宽频技术、数字显示及处理技术等结合起来，进一步推动了电子产品的快速发展。

在现代电子测量技术中，已基本形成一种根据物理学原理而建立起来的自校准技术。它利用计算机的数据存储和处理能力，将一些标准件接入系统中进行测量，其测量结果与标准件所给出的数值差别，即为系统本身的固有误差。将以上误差信息储存起来，在以后测量时，通过计算机储存的误差信息修正被测件的测试数据，得到准确的测量结果。

5.3.1 二极管的常规检测

二极管的常规检测项目主要有外观检查、外形尺寸检测、极性检测、正向电压 V_F 检测、反向漏电流 I_R 检测、反向击穿电压 $V_{(BR)}$检测等。

1．外观检查

1）外观检查方法

二极管的外观检查一般是参照（GB/T 4589.1—2006/IEC 60747-10：1991）《半导体器件 第10 部分：分立器件和集成电路总规范》中 4.3.1.1 外部目检的要求，严格按照相对应的二极管产品详细规范中外观检查的要求来进行。检查项目包括：

① 生产商标志及其清晰情况；

② 产品型号或印章标志及清晰情况；

③ 产品质量保证等级代码及其清晰情况；

④ 产品生产批号或代码标志及其清晰情况；

⑤ 负极标志或引出端识别情况；

⑥ 外观完整性（主要是有无毛边、毛刺、飞边、附着物、划痕、变形等机械缺陷以及麻点、变色等光学缺陷）。

2）外观检查设备

二极管的外观检查设备通常有放大镜、体视显微镜等，如图 5.27 所示。

图 5.27　台式放大镜和体视显微镜

3）注意事项

① 外观检查一般应放在二极管检测的第一步进行，以避免其他检测操作过程对二极管外观造成的划痕、变形等影响。

② 外观检查一般要求戴细纱手套或指套操作，不能直接用手接触待检样品，以避免手汗对二极管外观造成的玷污等影响。

③ 外观检查时的照明条件必须满足待检二极管详细规范中的相应规定。

⑤ 当使用放大镜或体视显微镜进行外观检查时，放大镜或体视显微镜的放大倍率必须满足待检二极管详细规范中的相应规定。常用的放大倍率有 5×、10×、30×等。

2. 外形尺寸检测

1）外形尺寸检测方法

二极管的外形尺寸检测一般要参照（GB 7581—87）《半导体分立器件外形尺寸》和（GB/T 4589.1—2006/IEC 60747-10：1991）《半导体器件第 10 部分：分立器件和集成电路总规范》中 4.3.2 尺寸的要求，严格按照相应产品详细规范中尺寸检测要求执行。

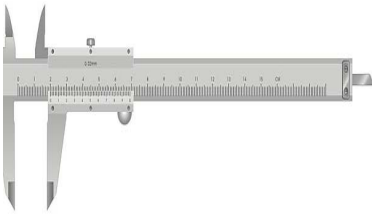
二极管的外形尺寸检测通常要求在室温条件下，使用经计量检定合格的测量设备，按详细规范的具体规定，检测各项物理尺寸的值，并判定其是否满足相应的尺寸公差规范要求。

2）外形尺寸检测设备

二极管外形尺寸的常用检测设备有千分尺/螺旋测微计、游标卡尺、测量显微镜、投影测量仪等，如图 5.28 所示。

千分尺/螺旋测微计

数显千分尺/螺旋测微计



游标卡尺

数显游标卡尺

数显测量显微镜　　投影测量仪

图 5.28　各种测量仪器

3）注意事项

① 外形尺寸检测一般要求戴细纱手套或指套操作，不能直接用手接触待检样品，以避免手汗对二极管外观造成的玷污等影响。

② 外形尺寸检测时的照明条件，必须满足所用测量设备的照明需求，以免影响测量设备的测量精度和测量数据的准确性。

③ 外形尺寸检测设备必须经计量检定合格，并在合格有效期内使用。

④ 实施外形尺寸检测的工作环境必须要满足待检二极管详细规范中的相应规定。多数情况下是要求常温/室温、25 °C 或者（25 ± 5 ）°C 等。

3. 极性检测

1）极性检测方法

二极管的极性标志一般要参照（GB/T 12560—1999）《半导体器件分立器件分规范》2.4 引出端识别 2.4.1 二极管规定，用下述方法之一清晰地表示二极管的极性：

（1）整流二极管图形符号，箭头指向阴极。

（2）按下述色标：

① A20 外形（IEC191Ⅱ）《半导体器件的机械标准化第 2 部分尺寸》,（GB/T7581—87）《半导体分立器件外形尺寸》中的 D2-04A 和更小外形的二极管：

用一条明显的色带或一色点在这些二极管的阴极端进行标志。但当用色带识别型号时，可采用将第一条色带宽度加倍的方法来识别阴极端。如果二极管的管壳比 AIB（IEC 191-2，GB/T 7581 的 D2-03B）还小，其阴极端色标有可能与型号标志混淆时，后者应省略。

② 比 A20 外形更大的二极管，阴极端应使用红色。

二极管的极性检测是基于二极管具有的单向导电性。通常可使用万用表电阻 $R \times 1$ k 挡位进行测量，其方法是用万用表的红表笔和黑表笔交换测量二极管两引脚之间的电阻，表针较大变化或有示值较小的测量即表示正向导通（二极管正偏时电阻较小，反偏时电阻趋于无穷大）。由于红表笔内接电源负极，黑表笔内接电源正极，所以当正偏时，即表示黑表笔所连接二极管那端引脚为二极管正极，红表笔所连接的一端则为二极管负极。

二极管的极性标志应符合相应的产品详细规范中标识要求。

二极管的外形尺寸检测通常要求在室温条件下，使用经计量检定合格的测量设备，按详细规范的具体规定，检测各项物理尺寸的值，并判定其是否满足相应的尺寸公差规范要求。

2）极性检测设备

常用的二极管极性检测设备是万用表，其外形图如图 5.29 所示。

指针式万用表

数字式万用表

图 5.29　两种万用表

3）注意事项

二极管极性检测一般要求戴细纱手套或指套操作，不能直接用手接触待检样品，以避免手汗对二极管外观造成的玷污等影响。

（1）直流测试的一般注意事项如下：

① 对于半导体整流二极管正向特性的测量，直流电源的质量并不重要，只要峰-峰的纹波值小于 10%即可。

② 对于反向特性的测量，电压源峰-峰的纹波值不应超过 1%，并要特别注意确保不致因为任何电压瞬变而超过整流二极管的电压额定值。

（2）交流测试的一般注意事项如下：

① 可在电源电路中接入二极管，以保护示波器内的放大器免受无用半周脉冲的影响。

② 在测量小的反向电流时，有必要采取适当的预防措施来避免干扰，例如采用屏蔽变压器并适当的接地，还应注意避免杂散电容。

③ 应特别注意尽量降低残余电感，对大电流器件尤应如此。

（3）温度条件：对于下述所有的电特性测量，都应规定温度条件，应在达到热平衡后进行测量。

（4）测试环境条件：采用说明。

4. 正向电压检测

1）直流法

采用直流法检测二极管两端的正向电压 V_F，是在规定的温度 T 和正向电流 I_F 条件下进行的，其检测电原理图如图 5.30 所示。其中，D 为被测二极管；R 为限流电阻器；G 为可调直流电压源。

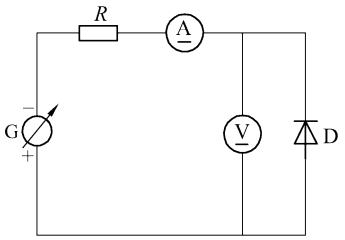


图 5.30　直流法检测二极管正向电压（V_F）

测量时，先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case} 或基准点温度 T_{ref}），调节直流电压源，使通过二极管的正向电流达到规定值 I_F，然后从电压表上读得二极管两端的正向电压 V_F。

2）示波器法（V_{FM}）

在规定的条件下，用示波器法测量整流二极管的正向电压瞬时值，电路原理图如图 5.31 所示。其中，D 为被测二极管；R_1 为已校准的取样电阻器；R_2 为低值电阻器；G 为可调交流电压源。

测量时，首先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case} 或基准点温度 T_{ref}），然后调节可调交流电压源 G，使被测二极管正向施加正弦半波电流，在示波器上读出显示的电压-电流曲线。

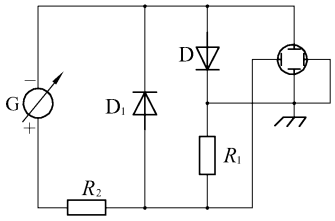


图 5.31　正向电压测试电路（示波器法）

3）脉冲法（V_{FM}）

在规定的条件下，用脉冲法测量整流二极管的正向电压，电路原理图如图 5.32 所示。其中，D 为被测二极管；G_1 为脉冲电压发生器；R_1 为保护电阻器；R_2 为已校准的电流取样电阻器。

测量时，首先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case} 或基准点温度 T_{ref}），然后将脉冲发生器电压调节到零，增加脉冲发生器输出电压，使流过二极管的正向电流达到规定值，最后在示波器上读出测量的正向电压。

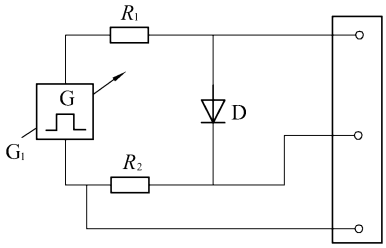


图 5.32　正向电压测试电路（脉冲法）

可用峰值读数仪表代替示波器，但必须是在正向电流达到其峰值时，才测量正向峰值电压的仪表。

4）正向平均电压（$V_{F(AV)}$）

在规定的条件下，测量整流二极管的正向平均电压，电路原理图如图 5.33 所示。其中，D 为被测二极管；G_1 为可调高阻抗电流源，以确保正弦半波正向电流流过被测二极管；A 为平均值电流表；V 为平均值电压表；R_1 和 D_1 必须保证当被测二极管和 D_1 反偏时几乎全部偏置电压都加在 D_1 上。

测量时，首先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case} 或基准点温度 T_{ref}），然后调节交流电流源，使流过被测二极管的电流达到规定的平均值，在动圈式电压表上测得二极管的正向平均电压。

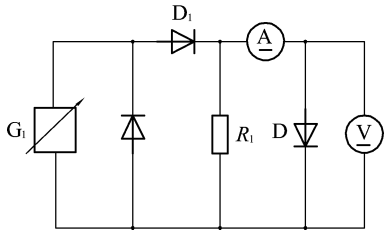


图 5.33　正向平均电压测试电路

5）注意事项

① 注意防止热造成的不稳定。

② 脉冲发生器的脉冲宽度和重复频率的选择应使得测量期间被测管内部的发热可以忽略。

③ 通常取脉冲宽度 100 ~ 500 μs 就可以满足。对于大功率整流二极管，取基本脉冲宽度为 1 ms 或更长的正弦脉冲，可能更适合于建立载流子平衡。

5. 击穿电压（V_{BR}）检测

1）脉冲法

在规定的条件下，用脉冲法测量二极管的击穿电压，电路原理图如图 5.34 所示。其中，D 为被测二极管；R 为已校准的无感电阻器；G 为脉冲恒流源或正弦半波发生器。

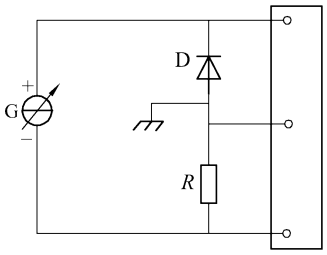


图 5.34　击穿电压测试电路（脉冲法）

测量时，首先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case}，或基准点温度 T_{ref}），然后增加脉冲恒流源或正弦半波发生器的输出以获得规定的反向电流值，最后在峰值读数仪表上读出击穿电压。

2）注意事项

脉冲恒流源的脉宽和占空比应使得二极管内部的发热可以忽略不计。

6. 反向电流（I_R）检测

1）直流法（I_R）

在规定的反向电压下，用直流法测量二极管的反向电流，电路原理图如图 5.35 所示。其中，D 为被测二极管；R 为限流电阻器；G 为可调直流电压源。

测量时，首先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case}，或基准点温度 T_{ref}），然后调节直流电压源，使被测二极管两端的电压 V_R 达到规定值，从电流表上读得反向电流 I_R。

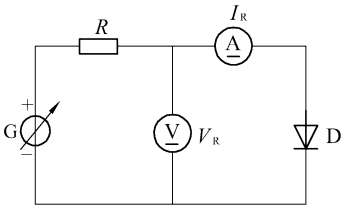


图 5.35　反向电流测试电路（直流法）

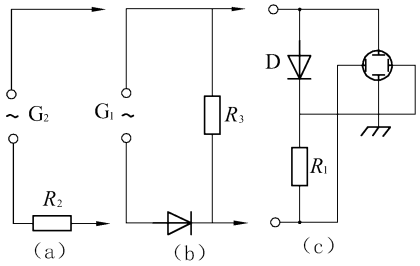


图 5.36　反向电流测试电路（示波器法）

2）示波器法（I_R）

在规定的条件下，用示波器法测量二极管的反向电流瞬时值，电路原理图如图 5.36 所示。其中，G_1 为低阻抗交流电压源；G_2 为高阻抗交流电压源；D 为被测二极管；R_1 为已校准的取样电阻器；R_2 为高阻值电阻器，使正反向电流值相等；R_3 为低值电阻器。

根据使用电源的阻抗，分别采用图中（a）或图中（b）与图中（c）的线路连接构成测试电路。

测量时，首先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case}，或基准点温度 T_{ref}），然后调节交流电压源使被测二极管两端的反向电压 V_R 达到规定值，在示波器上读出显示二极管的电压-电流曲线。

3）反向峰值电流（I_{RM}）

在规定的条件下，测量在反向重复峰值电压规定值下，二极管的反向峰值电流，电路原理图如图 5.37 所示：其中，D_1 为被测二极管；D_2 和 D_3 为提供负半周通路的二极管，这样使测量的仅仅是整流二极管的反向特性；G_1 为交流电压源；R_1 为限流保护电阻器；R_2 为已校准的电流读数电阻器。

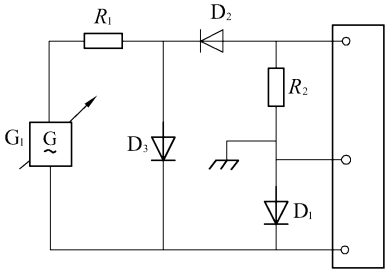


图 5.37　反向峰值电流测试电路

测量时，首先将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case}，或基准点温度 T_{ref}），然后调节交流电压源，使被测二极管两端的反向重复峰值电压达到规定值，最后在与 R_2 两端连接的示波器上测量通过整流二极管的反向峰值电流。

可以用峰值读数仪表代替示波器，但该仪表必须是在反向电压达到峰值时，才可以测量反向峰值电流的仪表。

7. 具有正向平均电流功耗时的反向峰值电流（I_{RM}）

测量具有正向平均电流功耗时的反向电流，试验电路采用如同耐久性试验的模拟电路，电路原理图如图 5.38 所示。

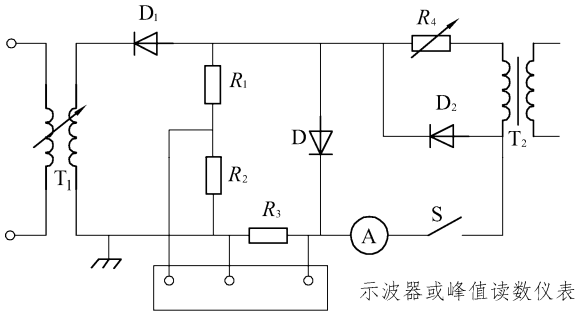


图 5.38　具有正向平均电流功耗时的反向峰值电流测试电路

其中，T_1 为向被测二极管提供反向半波电压的小电流高电压变压器；T_2 为向被测二极管提供正向半波电流的大电流低电压变压器；D 为被测二极管；D_1 为阻断被测二极管正向半波的二极管；D_2 为 T_2 的平衡二极管；A 为测量正向平均电流的电流表；R_1、R_2 为适应测量仪器而设的已校准的分压器；R_3 为已校准的电流取样电阻器；R_4 为提供规定正向电流的可变电阻器；S 为被测二极管正向导通的半周期间，具有 130°～180°导通角的电子开关或机电开关，开关断开时，流过开关的漏电流必须小于被测二极管的反向电流。

测量时，首先调节 R_4 将正向电流调整到规定值，然后按正确的相位连接变压器 T_1 的输出，并调节输入电压以获得规定的峰值电压，把冷却条件调整到规定的环境、管壳或基准点温度，在示波器或峰值读数仪表上观测反向电流。

5.3.2 二极管的特殊检测

1．恢复电荷 Q_r 和反向恢复时间 t_{rr} 的检测

1）正弦半波法

在规定的条件下测量二极管的恢复电荷 Q_r 和反向恢复时间 t_{rr}，电路原理图和波形图如图 5.39 和图 5.40 所示。

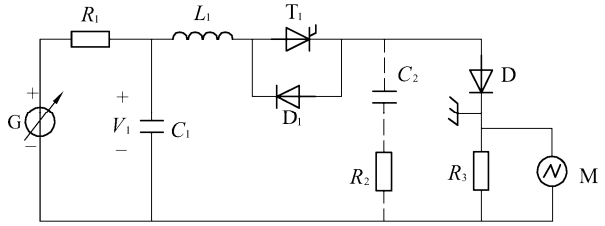


图 5.39　恢复电荷和反向恢复时间测试电路（正弦半波法）

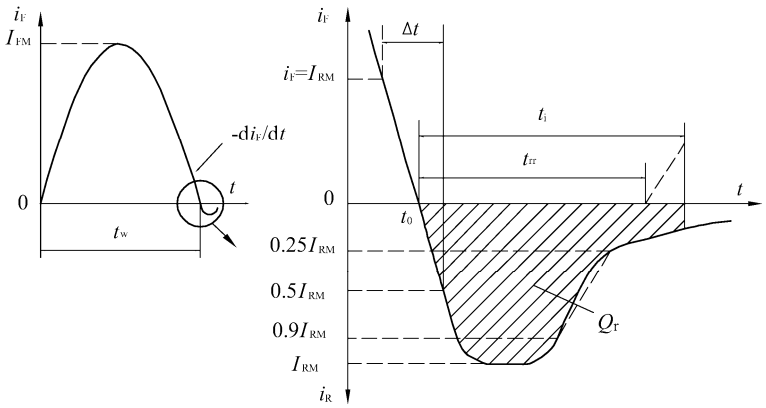


图 5.40　通过二极管 D 的电流波形

其中，C_1 为供给正向电流的电容器（同时见 L_1）；C_2 为抑制高反向感应电压的电容器；D 为被测二极管；D_1 为反向并联二极管；G 为电压源；L_1 为调节正向电流变化率 $-\mathrm{d}i_F/\mathrm{d}t$ 和脉冲宽度（$t_w=\pi$）的电感器；M 为测量仪器（如示波器）；R_1 为抑制 C_1 充电的电阻器；R_2 为抑制高反向感应电压的电阻器；R_3 为已校准的电流读数无感电阻器；T_1 为电子开关（如闸流管）。

测量时，触发闸流管 T_1 通过调节电压源 G，使通过二极管 D 的正向峰值电流 I_{FM} 达到规定值。脉冲宽度 t_w、正向电流变化率 $-\mathrm{d}i_F/\mathrm{d}t$ 和 C_1 两端的电压 V_1 应与规定的条件一致。

测出的恢复电荷为

$$Q_r=\int_{t_0}^{t_0+t_i} i_R \mathrm{d}t \tag{5-5}$$

式中　t_0——电流通过零值的瞬间；

t_i——规定的积分时间，最好等于 t_{rr} 的最大规定值。

反向恢复时间 t_{rr} 的测量为：电流通过零值的瞬时值 t_0 与由于 i_R 值的减小，经过 $0.9I_{RM}$

和 $0.25I_{RM}$ 两点的直线与零电流轴相交所确定的瞬时值之间的时间间隔。

注：正向电流变化率是在零点两侧电流 $i_F = I_{RM}$ 和 $i_R = 0.5I_{RM}$ 之间测量的。

$$-\mathrm{d}i_F / \mathrm{d}t = \frac{3}{2} \cdot \frac{I_{RM}}{\Delta t} \tag{5-6}$$

2）矩形波法

在规定的条件下测量二极管的恢复电荷 Q_r 和反向恢复时间 t_{rr}，电路原理图和波形图如图 5.41 和 5.42 所示。

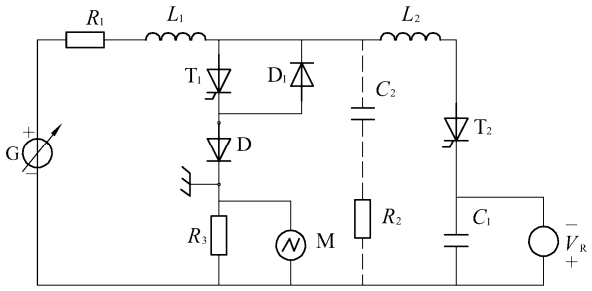


图 5.41　恢复电荷和反向恢复时间测试电路（矩形波法）

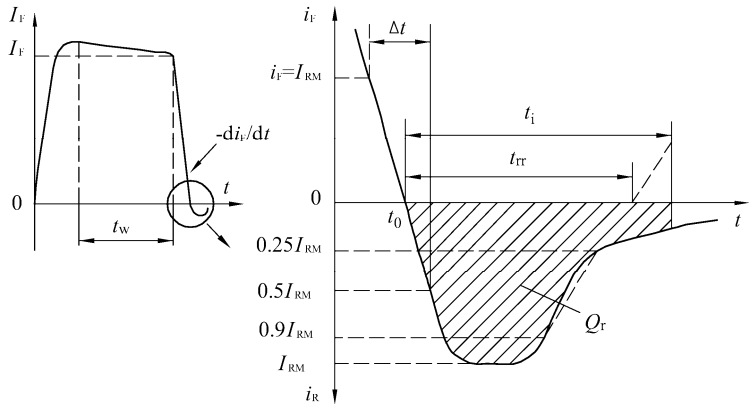


图 5.42　通过二极管 D 的电流波形

其中，C_1 为供给反向恢复电流的电容器；C_2 为抑制高反向感应电压的电容器；D 为被测二极管；D_1 为反向并联二极管；G 为电压源；L_1 为阻断反向电压的电感器（所选的 L_1/R_1 值比 t_w 小得多）；L_2 为调节正向电流变化率 $-\mathrm{d}i_F/\mathrm{d}t$ 的电感器；M 为测量仪器（如示波器）；R_1 为正向电流限流电阻器；R_2 为抑制高反向感应电压的电阻器；R_3 为已校准的电流读数无感电阻器；T_1 和 T_2 为电子开关（如闸流管）。

测量时，触发闸流管 T_1 通过调节电压源 G，给出 T_2 触发前正向电流 I_F 的规定值；在脉冲宽度 t_w 之后触发 T_2，通过外加一个反向电压 V_R 使二极管电流反向；用与电容器相连的反向电压 V_R 和感应线圈 L_2 使正向电流变化率调至规定值。

测得的恢复电荷为

$$Q_r = \int_{t_0}^{t_0+t_i} i \cdot \mathrm{d}t \tag{5-7}$$

式中：t_0——电流通过零时的瞬间；

t_i——规定的积分时间，最好等于 t_{rr} 的最大规定值。

反向恢复时间 t_{rr} 的测量为：电流通过零时的瞬时值 t_0 与由于 i_R 值的减小，经过 $0.9I_{RM}$ 和 $0.25I_{RM}$ 两点的直线与零电流轴相交所确定的瞬时值之间的时间间隔。

注：正向电流变化率是在零点两侧电流 $i_F = I_{RM}$ 和 $i_R = 0.5I_{RM}$ 之间测量的。

$$-\mathrm{d}i_F / \mathrm{d}t = \frac{3}{2} \cdot \frac{I_{RM}}{\Delta t} \tag{5-8}$$

2. 正向恢复时间 t_{fr} 和正向恢复峰值电压 V_{FRM} 的检测

1）测量方法

测量整流二极管的正向恢复时间 t_{fr} 和正向恢复峰值电压 V_{FRM}，电路原理图和测试波形图如图 5.43 和 5.44 所示。

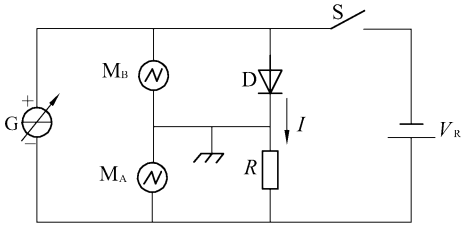


图 5.43　正向恢复时间和正向恢复峰值电压测试电路

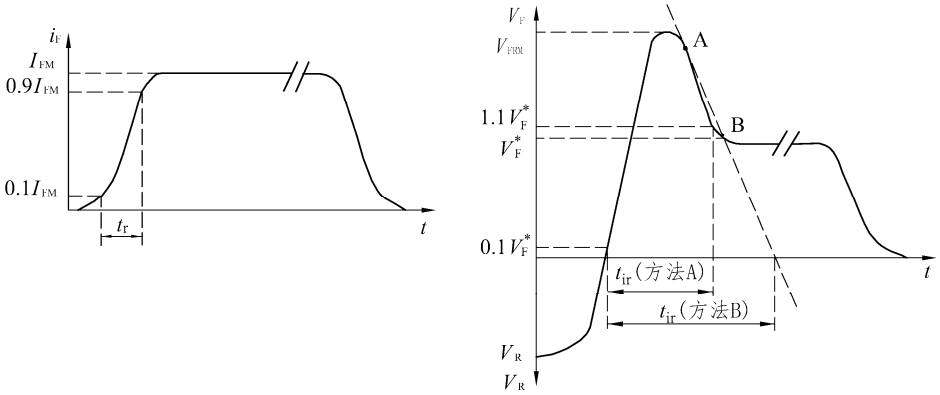


图 5.44　电流波形和电压波形

其中，D 为被测二极管；G 为脉冲电流发生器，其电压（开路输出电压）为 50 V，（最小）或 3 倍的 V_{FRM}，取较大者；R 为已校准的无感电阻器；S 为电子开关，除了在电流脉冲和整个脉冲宽度开始前一个周期外，均关闭；M_A 和 M_B 为示波器或其他监测仪器。

测量时，将温度设置到规定值 T（环境温度 T_{amb}、管壳温度 T_{case} 或基准点温度 T_{ref}），然后通过仪表 M_A 监测电流波形，将脉冲电流源调到规定的上升时间 t_r 和正向电流 I_{FM}；将反向电压 V_R 调到规定值，并适当设置开关 S。

2）注意事项

① 脉冲宽度应足够长以使正向电压达到稳定值 V_F^*。

② 脉冲宽度和脉冲电流发生器的工作周期应使得二极管的内部热量可忽略不计。

③ 正向恢复峰值电压 V_{FRM} 和正向恢复时间 t_{fr} 的测量是按规范中规定的方法，在 M_B 上监测二极管两端的电压波形。

3. 稳态热阻（R_{th}）的检测

1）测量方法

检测整流二极管结到基准点（最好在管壳上）之间的热阻，测量方法是基于：在两次不同的耗散功率 P_1 和 P_2，以及导致两次结温相同的冷却条件下，测量器件两次的基准点温度 T_1 和 T_2，两次结温是否相同可用在基准电流下的正向电压来验证。

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{P_1 - P_2} \tag{5-9}$$

测量的基本电路原理图如图 5.45 所示。其中，D 为被测二极管；I_1 为在结产生耗散功率 P 的负载电流，可以是直流电流，也可以是交流电流；I_2 为在负载电流 I_1 周期性切断的短时间内，作为监测用的基准直流电流；W 为指示负载电流 I_1 在结中产生的耗散功率 P 的瓦特表（对于交流法，W 测量的是被测器件的平均耗散功率），S_1 为周期性切断负载电流的电子开关（对于直流法），对于交流法，开关 S_1 不一定使用；S_2 为负载电流切断时外于闭合状态的电子开关；V 为零示法电压表。

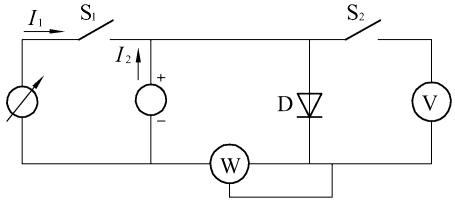


图 5.45　稳态热阻的测试电路

注：上述所列的负载电流 I_1 可以为零；则耗散功率 P_1 也是零，这时等效结温等于基准点温度 T_1。

测量时，将被测器件紧固在保持某一固定温度的散热器上，把热偶固定在基准点上，以测量被测器件的温度。测试按以下两步进行：

① 使散热器维持在一个较高的温度上，施加一小的负载电流 I_1，则在结中产生耗散功率 P_1。达到热平衡后，调整零示法电压表 V，处于零点平衡状态。记录基准点温度 T_1。

② 使散热器维持在一个较低的温度上，增大负载电流 I_1，直至功率 P_2，使结温上升到与步骤①时的温度相同。这可由零示法电压表 V 的零平衡来显示。记录基准点温度 T_2。

热阻 R_{th} 可用下式计算：

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{P_1 - P_2} \tag{5-10}$$

2）注意事项

① 对于制造厂已经为热测量钻了孔的器件，管壳温度用插入该孔内的热偶测量。热偶截面的直径不应大于 0.25 mm，热偶小球最好用电焊法而不用锡焊或绞扭法形成。小球插入孔内后，轻轻敲击孔边金属将热偶小球盖住。

② 对于其他器件，基准点温度需用热容量可以忽略的温度敏感元件来测量。必要时，用黏合、焊接、夹紧或卡住等方法使热敏元件与器件管壳可靠贴紧，保证热阻可以忽略不计。

③ 当从负载电流 I_1 转换到基准电流 I_2 时，由于器件多余载流子的存在而出现瞬态电压。如果被测器件的管壳包含铁磁性材料，则会产生附加的瞬态电压，因此，这些瞬态效应消失之前，不应闭合 S_2。

4. 瞬态热阻抗（$Z_{(th)t}$）检测

1）测量方法

测量二极管结到基准点（最好在管壳上）之间的瞬态热阻抗，其测量方法是基于：对器件施加加热电流并待其达到热平衡后，记录器件中功率的耗散。随即切断加热电流，并以时间为函数记录基准电流下的正向电压和基准点温度。然后，用在相同基准电流下得到的校准曲线计算随时间变化的等效结温。基本电路原理图如图 5.46 所示。其中，D 为被测二极管；I_1 为在结产生耗散功率 P 的负载电流；I_2 为基准直流电流；S 为切断负载电流 I_1 的开关；W 为指示由负载电流 I_1 在结中产生的耗散功率 P 的瓦特表；R_e 为记录装置，如示波器，用于记录由于 I_2 产生的正向电压随时间的变化。

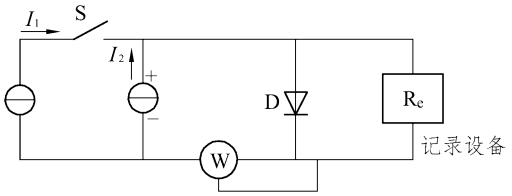


图 5.46　瞬态热阻抗的测试电路

测量时：① 测量由基准电流 I_2 产生的正向电压与由外部加热（如用油槽）改变器件温度而变化的等效结温之间的函数关系，绘制出校准曲线。

② 将被测器件紧固在保持某一固定温度的散热器上。把热偶固定在基准点上以测量被测器件的基准点温度 T_{ref}。施加加热电流 I_1，使被测器件产生耗散功率 P 直到建立热平衡为止。

③ 断开开关 S，切断加热电流 I_1，用记录设备 R_e 记录由基准电流 I_2 产生的正向电压随冷却时间变化的关系。记录该期间的基准点温度。

④ 用校准曲线，将记录的正向电压曲线转换成等效结温（T_{vj}），则瞬态热阻抗 $Z_{(th)t}$，用下式计算：

$$Z_{(th)t} = \frac{[T_{(vj)}(0) - T_{ref}(0)] - [T_{(vj)}(t) - T_{ref}(t)]}{p} \qquad (5\text{-}11)$$

式中，$T_{(vj)}(0)$，$T_{ref}(0)$ 为开关 S 断开时 $t = 0$ 的温度；$T_{(vj)}(t)$，$T_{ref}(t)$ 为在时间 t 的温度。

5. 正向（不重复）浪涌电流（I_{FSM}）的测量

测量方法：在规定条件下，验证二极管正向（不重复）浪涌电流额定值，电路原理图如图 5.47 所示。

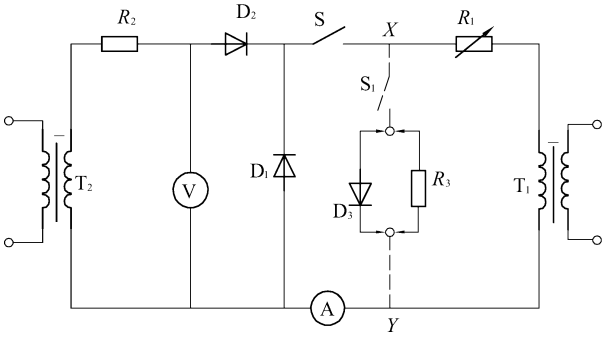


图 5.47　验证正向（不重复）浪涌电流额定值的电路

其中，A 为峰值读数仪表（如电流表或示波器）；D_1 为被试二极管；D_2 为阻断由变压器 T_2 提供正向电压的二极管；R_1 为调节浪涌电流的电阻器，（若电路中接有 D_3 时），其值应大于二极管 D_3 的正向电阻（见下面注解）；R_2 为保护电阻器，此电阻应尽可能小；S 为机电开关或电子开关，在正向（浪涌）半周工作期间，其导通角应接近于 180°；T_1 为通过开关 S 向被试管提供正向（浪涌）半周的低压大电流变压器，其电流波形基本上是宽度约为 10 ms 的正弦半波，其重复频率约为每秒 50 个脉冲；T_2 为通过二极管 D_2 向被试管提供反向半波的高压小电流变压器，若该变压器由一个单独电源馈电，则其相位必须与加在 T_1 上的电源一致，其电压波形基本上应为一正弦半波；V 为峰值读数仪表（如电压表或示波器），如需改进电路，则可在 X 与 Y 点之间接入一个由二极管 D_3 与开关 S_1 串联的支路，或者接入一个由电阻 R_3 与开关 S_1 串联的支路（这些电路是非强制性的）；D_3 为平衡电流的二极管，具有和被试二极管大致相同的正向电阻值；如果用电阻 R_3，则 R_3 的电阻值亦应与被试二极管的正向电阻值相同；S_1 为机电或电子开关，在变压器 T_1 的反向半周期间具有约 180°的导通角。

试验时，将电压源与电流源调至零，整流二极管按其极性标志插入试验管座，并检查其温度条件，用峰值读数仪表 V 测量，将反向峰值电压调节到规定值，调节 R_1，将由峰值读数仪表 A 上测得的正向浪涌电流调至规定值，按规定的浪涌次数对被试整流二极管施加正向浪涌电流，根据试验后的测量来验证整流二极管承受正向浪涌电流额定值的能力。

6. 反向不重复峰值电压（V_{RSM}）的测量

测量方法：在规定的条件下，验证二极管的反向不重复峰值电压额定值，电路原理图如图 5.48 所示。其中，D_1 为提供半波通路的二极管，仅用来测量被试二极管的反向特性；D_2 为被试二极管；G_1 为交流电压源；S 为机电开关或电子开关（导通角约为 180°），向被试二极管施加反向半周期电源电压；V 为峰值读数仪表。

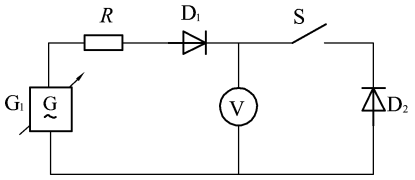


图 5.48　验证反向不重复峰值电压额定值的电路

试验时，偏置条件为零时，把被试整流二极管插入试验管座，断开开关 S 并提高交流电压到反向不重复峰值电压的额定值，检查规定的温度条件，接通开关 S（导通角近似 180°），将规定的反向不重复峰值电压加到被试二极管，根据试验后的测量来验证整流二极管承受反向不重复峰值电压额定值的能力。

注：重复率应保证前一个脉冲的热效应在下一个脉冲到达之前已完全消失。

7. 反向峰值功率（重复或不重复的）（P_{PRM}、P_{RSM}）的测量

1）三角波脉冲法

在规定的条件下，三角波脉冲法验证二极管的反向峰值功率额定值，电路原理图如图 5.49 所示。其中，D 为被试二极管；G_1 为可调交流电压源；D_1 为整流二极管；R_1 为限流电阻器；C 为调节脉冲宽度的可变电容器；R_1 为调节反向开路峰值电压的可变无感电阻器，D_2 为隔流二极管；S_1 为使电容器 C 放电的机电开关或电子开关（如火花放电器或闸流管）；R_3 为电流读数无感电阻器；M_1 为测量反向开路峰值电压的仪器（如示波器），M_2 为测量反向电流脉冲宽度的仪器（如示波器），M_1 和 M_2 可以合并（如双踪示波器）。

反向电流脉冲如图 5.50 所示。

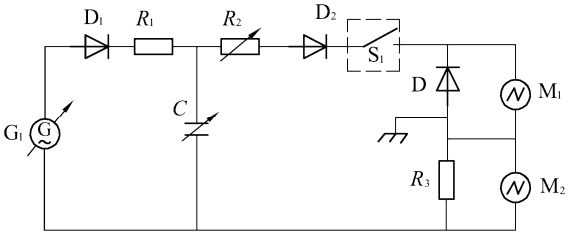
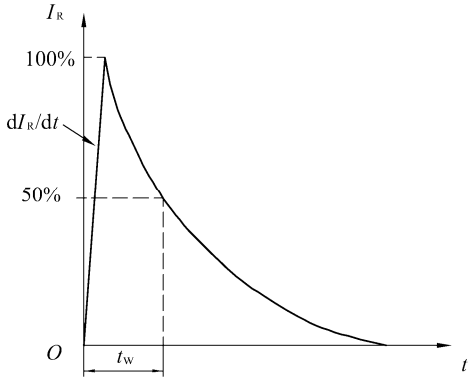


图 5.49　验证二极管的反向峰值功率额定值的电路（三角波脉冲法）



t_w = 规定的脉冲宽度

图 5.50　反向电流波形

2）正弦波脉冲法

在规定的条件下，正弦波脉冲法验证二极管的反向峰值功率额定值，电路原理图如图 5.51 所示。其中，D 为被试二极管；G_1 为可调交流电压源；D_1 为整流二极管；R_1 为限流电阻器；C 为调节脉冲宽度的可变电容器；R_2 为调节反向开路峰值电压的可变无感电阻器；S 为使电容器 C 向变压器 T_t 的初级线圈放电的机电开关或电子开关（如火花放电器或闸流管）；T_r 为高压变压器；PM 为防止 T_r 饱和的预磁化源或其他适当装置；D_2 为隔流二极管；R_3 为电流读数无感电阻器；M_1 为测量反向开路峰值电压的仪器（如示波器），M_2 为测量反向电流脉冲宽度的仪器（如示波器），M_1 和 M_2 可以合并（如双踪示波器）。

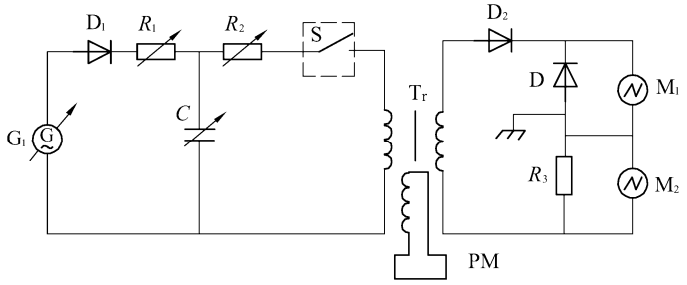
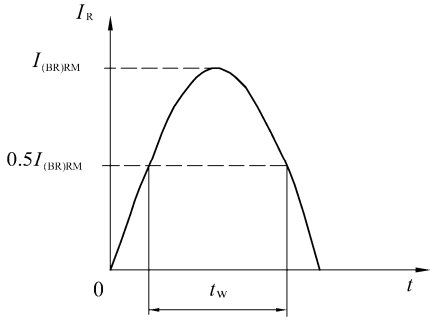


图 5.51　验证二极管反向峰值功率额定值的电路（正弦波脉冲法）

反向电流脉冲如图 5.52 所示。



t_w = 规定的脉冲宽度

图 5.52　反向电流波形

3）矩形波脉冲法

在规定的条件下，正弦波脉冲法验证二极管的反向峰值功率额定值，电路原理图如图 5.53 所示。其中，D 为被试二极管；G_1 为能提供单个或多个矩形脉冲电压的可调脉冲发生器；R_1 为电流读数无感电阻器；R_2 调节反向开路峰值电压的可变无感电阻器；M_1 为测量反向开路峰值电压的仪器（如示波器），M_2 为测量反向电流脉冲宽度的仪器（如示波器），M_1 和 M_2 可以合并（如双踪示波器）。

反向电流脉冲如图 5.54 所示。

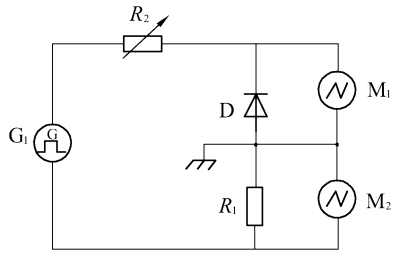
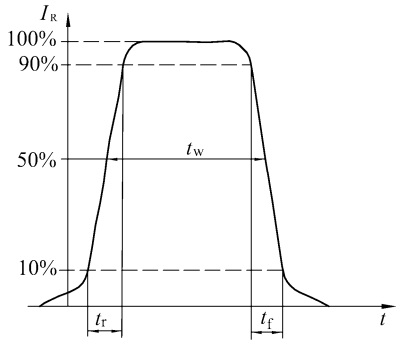


图 5.53　验证二极管反向峰值功率额定值的电路（矩形波脉冲法）



t_w = 规定的 50%脉冲幅度上的平均脉冲宽度

$t_r \leqslant 20\% t_w$　　$t_f \leqslant 20\% t_w$

图 5.54　反向电流波形

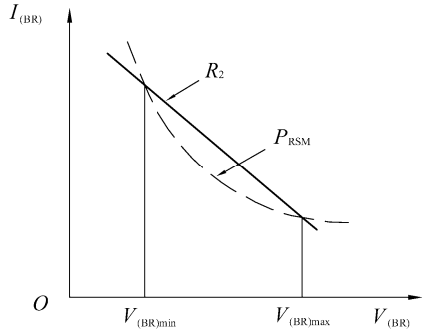
测量时，R_2 的值（包括电压源 G_1 的阻抗）由下式确定：

$$R_2 = \frac{V_{(BR)max} \times V_{(BR)min}}{P_{RSM}} \tag{5-12}$$

式中，$V_{(BR)max} = V_{(BR)}$ 的上限；$V_{(BR)min} = V_{(BR)}$的下限。

当夹具上无二极管时，电压源 G_1 产生的脉冲电压一直上升直到 M_1 上测得的反向开路峰值电压值等于 $V_{(BR)max} + V_{(BR)min}$，从而确保在 $V_{(BR)max}$ 和 $V_{(BR)min}$ 之间的任何反向电压的

反向功率都低于额定值 P_{RSM} 或最大等于额定值 P_{RSM}，见图 5.55。然后关闭脉冲发生器，但保持设置值。



R_2 = 负载线

图 5.55　验证 P_{RSM} 反向功率与击穿电压的关系曲线

根据二极管的极性标志，将其插入测试夹具中，将温度设置在规定值，施加规定的脉冲序列，根据通过试验测量的数据来验证二极管承受反向峰值功率额定值的能力。

8. 管壳非破坏峰值电流（I_{RM}）的测量

测量方法：在规定条件下，验证二极管的管壳非破坏峰值电流额定值，电路原理图和试验电流波形图如图 5.56 和 5.57 所示。

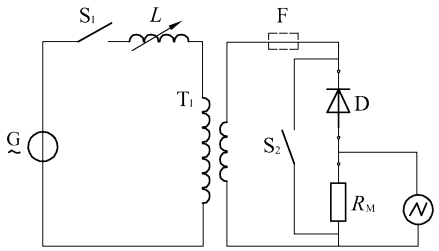


图 5.56　验证管壳非破坏峰值电流额定值的电路

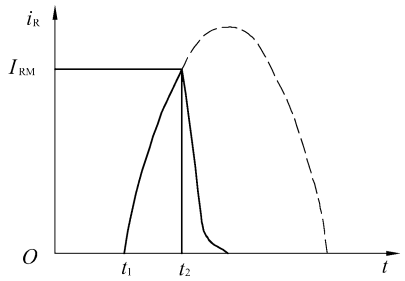


图 5.57　通过被试器件的反向电流 i_R 波形

其中，G 为具有适当短路能力的交流系统；S_1、S_2 为能在规定的线电压周期瞬间工作的大功率机电开关或电子开关；F 为代替 S_2 的任选保险（见测试步骤）；L 为可变电感器；T_t 为大功率变压器；R_M 为已校准的电流读数无感电阻器；D 为被试的整流二极管（或闸流管）。

试验前，应先用小功率高压脉冲或机械方法将被试器件损伤，这样击穿总是发生在硅片边缘。

注：需要时，机械损伤应在器件密封前完成。

对被试器件进行初始检漏试验，而且泄漏率应低于 10^{-7}Pa・m^3/s（10^{-6}bar・cm^3/s）。

试验时，将被试器件插入测试仪器中，在 t_1 瞬间闭合开关 S_1，这样电压以反方向施加于被试器件上，使击穿发生在先前被损伤点上。其结果是，反向电流急剧上升，其上升变化率可通过改变电感 L 来调节（在合理的极限内），在 t_2 瞬间，闭合开关 S_2，这样峰值电流被限制在规定的 I_{RM} 值。

另外，可将保险 F 置于电路中，当保险工作时便可中断通过被试器件的电流。

试验后，被试器件要进行检漏试验，泄漏率应低于 10^{-7}Pa・m^3s^{-1}(10^{-6}bar・cm^3s^{-1})，也可在电测量期间使用等离子体检漏仪，确保测量期间即使出现细小的裂纹，也没有等离子体逸出，电测量后，对器件进行目检。器件既不能有微粒脱落的痕迹，也不能有外部熔化或燃烧的迹象。

9. 热循环负载的测量

1）测量方法

用耐久性试验来验证某些类型的二极管承受结温波动的能力，电路原理图和波形图如图 5.58 所示。其中，D 为被试二极管；R_1 为电流读数无感电阻器；S 为机电或电子开关。

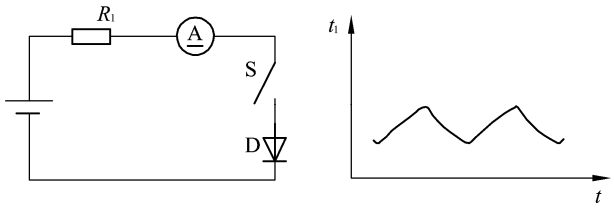


图 5.58　热循环负载试验电路和波形图

试验时，用规定电流（最好近似等于最大额定正向平均电流）加热二极管，直到其结温介于最高额定等效结温 $T_{(vj)max}$ 和（$T_{(vj)max}$ – 20）°C 之间，然后断开开关 S_1，使二极管冷却到等效结温不大于 40 °C。

2）注意事项

① 加热时间不应超过 6 min，冷却时间不应超过 8 min。

② 试验应按规定的循环次数进行。

③ 应在试验前后分别测量那些可能受本试验影响的参数。

10. 检波效率（η）的测试

二极管输入端加上规定频率的正弦电压 u_i 时，输出端的直流电压 U_o 与输入端的电压峰值 U_p 之比，称为检波效率 η。即

$$\eta = U_o/U_p \tag{5-13}$$

检波效率 η 的测试原理如图 5.59 所示。

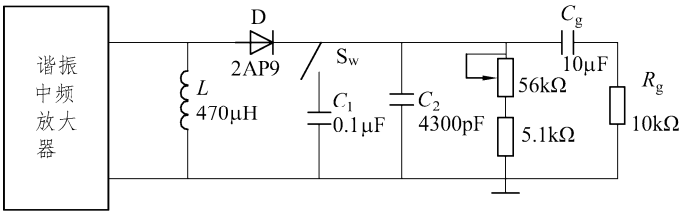


图 5.59　测试 η 的原理图

其中，R_g 为检波负载；$C \geqslant 100/(fR_g)$；f 为测试频率。

测试步骤如下：

① 调节信号源，使输入信号频率 f 和电压 u_i 符合规定值。

② 调节电容 C_1，使回路谐振。

③ 测出负载 R_g 上的直流电压 $U_o = I_g R_g$，即可求得 η。

11. 频率特性测试

二极管的高频整流电压 U_o' 与低频（0.1 MHz）整流电压 U_o 的变化率，称为检波二极管的频率特性。即

$$频率特性 = \frac{U_o - U_o'}{U_o} \times 100\% \tag{5-14}$$

频率特性的测试原理图如图 5.60 所示。其中，毫伏表为超高频毫伏表，终端负载在 400 MHz 以下为 75 Ω，400 MHz 以上为 50 Ω。

测试步骤如下：

① 调节信号源，使输出频率为 0.1 MHz，并使毫伏表的指示值为规定的 U_o 值，再记下此时的标准电压表的指示值。

② 再调信号源，使频率为规定的频率，并保持标准电压表的指示值不变。读取毫伏表的指示值 U_o' 即可求得频率特性。

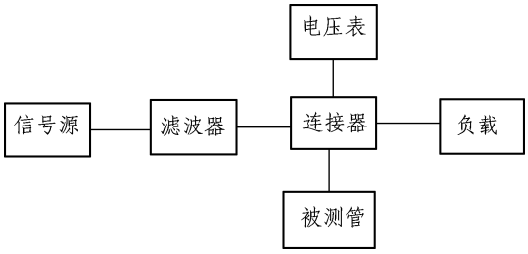


图 5.60　测试二极管频率特性的原理图

12. 二极管电容测量

1）电桥法

在给定电压和频率下，用电桥法测量二极管两端的电容，测试原理图如图 5.61 所示。

测试时，先单独调电容，使电桥平衡，读得电容指示值 C_1。然后调节偏置电源，使反向电压 U_R 为规定值，并重调电容，使电桥平衡，读得电容指示值 C_2。电容读数的变化值（$C_2 - C_1$），即为所测电容值。

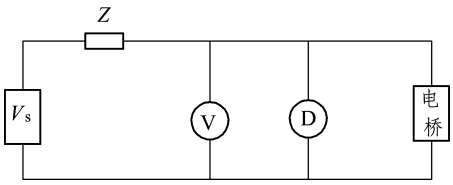


图 5.61　电桥法测二极管电容的原理图

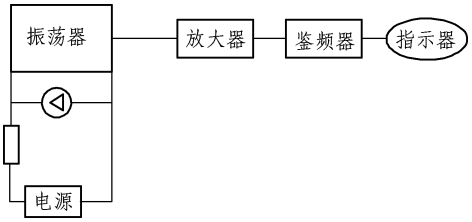


图 5.62　鉴频法测二极管电容的原理图

2）鉴频法

在给定电压和频率下，鉴频法测量二极管两端的电容，测试原理图如图 5.62 所示。测试

时，先不接被测管，调节振荡器，使指示器指示零位。然后接上被测管，调节偏置电源，使反向电压 U_R 为规定值。这时，指示器的指示值，即为所测电容值。

3）谐振法

在给定电压和频率下，谐振法测量二极管两端电容的原理图如图 5.63 所示。

测试时，先接通开关 K，调节偏置电源，使电压为规定值。然后，断开开关 K，调节微调电容 C_1，找到谐振点。此时，读得 C_1 的电容量为 C_o。再接通开关 K，重调 C_1，再次找到谐振点，读得 C_1 的电容量为 C_o'。则 C_1 的变化值（$C_o' - C_o$），即为所测电容值。

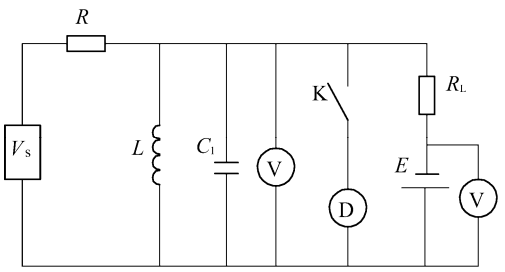


图 5.63　谐振法测试原理图

13. 变容管优值 Q_V 测试

在一定的频率和电压（或电容）下，变容二极管储存能量与消耗能量之比，称为变容管优值 Q_V，测试原理如图 5.64 所示。其中，电容 C 要比二极管电容大得多。

测试步骤：

① 不接被测管，调节 Q 表的可调电容，使回路谐振，读取 Q 表的指示值 Q_1 及电容的指示值 C_1。

② 接入被测管，调节偏置电源，使电压为规定值。然后重复上述步骤，并读取 Q_2 和 C_2。则二极管优值 Q_V 为

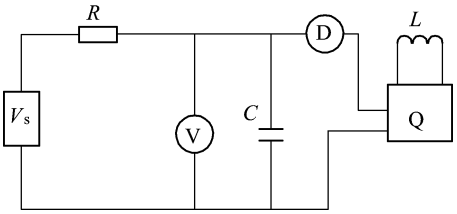


图 5.64　测量 Q_V 的原理图

$$Q_V = Q_1Q_2(C_1 - C_2)/[(Q_1 - Q_2)C_1] \tag{5-15}$$

14. 正向微分电阻 r_f 测试

给定正向电流 I_f 时，二极管电压 U 对电流 I 的变化率，称为正向微分电阻 r_f。即

$$r_f = \Delta U/\Delta I \tag{5-16}$$

正向微分电阻 r_f 的测试原理图如图 5.65 所示。

测试步骤：

① 调节信号源，使信号频率和幅度符合规定值。

② 将开关 K 置于校正位置，校正指示器的基准。

③ 将开关 K 置于测试位置，调节偏置电源，使二极管正向电流符合规定值 I_f。

这时，从指示器上读得的指示值，即为正向微分电阻 r_f。

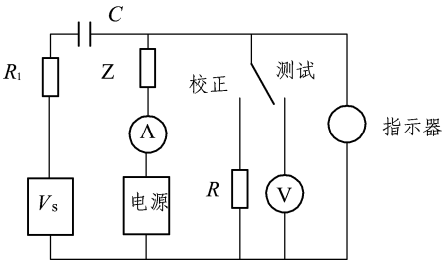


图 5.65　测试 r_f 的原理图

5.3.3 二极管检测实例

以 MM3Z5V1 型硅稳压二极管检测实例。

1．检测指标

1）外观要求

在正常照明条件和正常视力条件下（必要时在放大镜或显微镜下，按详细规范规定），下述各项要求应正确：

① 生产商标志应清晰；

② 产品型号或印章标志应清晰；

③ 产品质量保证等级代码应清晰；

④ 产品生产批号或代码标志应清晰；

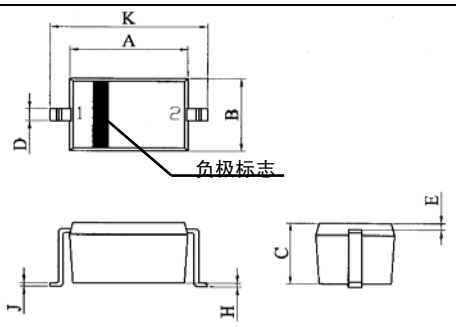
⑤ 负极标志或引出端识别应正确；

⑥ 外观应完整（应无毛边、毛刺、飞边、附着物、划痕、变形等机械缺陷以及麻点、变色等光学缺陷）。

2）外形尺寸要求

在室温条件下，使用经计量检定合格的测量设备进行测量，测量样品应满足表 5.9 所示各尺寸公差规范的要求。

表 5.9　外形尺寸要求

<table>
<tr><th>封装外形</th><th>外形尺寸图</th><th>单位为毫米</th></tr>
<tr><td>SOD-323</td><td> 
</td><td>
<table>
<tr><th>尺寸
符号</th><th colspan="2">SOD-323</th></tr>
<tr><td></td><td>min</td><td>max</td></tr>
<tr><td>A</td><td>1.55</td><td>1.75</td></tr>
<tr><td>B</td><td>1.15</td><td>1.35</td></tr>
<tr><td>C</td><td>0.80</td><td>1.00</td></tr>
<tr><td>D</td><td>0.25</td><td>0.40</td></tr>
<tr><td>E</td><td colspan="2">0.23REF</td></tr>
<tr><td>H</td><td>0.00</td><td>0.10</td></tr>
<tr><td>J</td><td>0.09</td><td>0.18</td></tr>
<tr><td>K</td><td>2.30</td><td>2.70</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

3）电参数指标要求

MM3Z5V1 型硅稳压二极管的各项电参数指标要求如表 5.10 所示。

表 5.10　电参数指标要求

参数名称	符号	测　试　条　件	最小值	典型值	最大值	单位
工作电压	V_Z	I_{ZT} = 5.0 mA	4.8	5.1	5.4	V
动态电阻	r_Z	$I_Z = I_{ZT}$ = 5.0 mA	—	—	60	Ω
拐点动态电阻	r_{ZK}	I_Z = 1.0 mA	—	—	500	Ω
反向漏电流	I_R	V_R = 2.0 V	—	—	5.0	μA

2. 仪器选择

1）外观检查

根据外观检查的要求，选择使用带照明装置的体视显微镜（见图 5.66）在 × 10 倍放大情况下对样品进行检查，以验证样品各项外观是否符合相应的要求。

2）外形尺寸

根据外形尺寸测试公差的要求，选择使用投影测量仪（见图 5.67）对样品进行测试，以验证样品各项外形尺寸是否符合相应的要求。

3）电参检测

根据样品需测试的电参数的要求，选择使用 351-TT/P 测试系统（见图 5.68）对样品电流、电压等主参数进行测试，以验证样品各项电参数是否符合相应的要求。

图 5.66　体视显微镜

图 5.67　投影测量仪

图 5.68　351-TT/P 测试系统

3. 检测步骤

1）外观检查

① 在工作环境干净整洁的情况下，按工作要求穿戴好工作服和静电防护用具，根据安全操作规程的要求，打开照明装置的电源开关，将体视显微镜的放大倍率置于 10 倍，在体视显微镜的视场区中放一调机样品，调节体视显微镜的焦距，使样品呈现清晰图像。

② 按工作要求准备好盛装“待检品”、“合格品”、“次品”、“废品”等分类的容器，并做好标志记录。

③ 根据外观检查的要求，逐个逐项检查待检产品，并做好相应记录，必要时拍取相应图片。

④ 按工作要求分类包装完产品，填写工作记录、报告，整理检查记录数据，清洁整理工作台面和体视显微镜。

⑤ 根据安全操作规程的要求，关闭照明装置的电源开关。

2）外形尺寸检测

① 在工作环境满足投影仪测量工作要求的工作条件（如温度、湿度、洁净度、气压、电源等）的情况下，按工作要求穿戴好工作服和静电防护用具，根据投影仪安全操作规程的要求，打开设备的电源开关，将投影仪的放大倍率置于适当值（通常为 10 倍），在投影仪的视场区中放一调机样品，调节投影仪的焦距，使样品呈现清晰图像。

② 按工作要求准备好盛装“待测品”、“合格品”、“次品”、“废品”等分类的容器，并做好标志记录。

③ 根据外形尺寸的测量要求，逐个逐项测量待测产品外形尺寸，并做好相应记录，必要时拍取相应图片。

④ 按工作要求分类包装完产品，填写工作记录、报告，整理测量记录数据，清洁整理工作台面和投影仪。

⑤ 根据安全操作规程的要求，关闭投影仪的电源开关。

3）电参检测

① 在工作环境满足 351-TT/P 测试系统工作要求的工作条件（如温度、湿度、洁净度、气压、电源等）的情况下，按工作要求穿戴好工作服和静电防护用具，根据安全操作规程的要求，顺序打开 351-TT/P 测试系统的各个电源开关，启动 351-TT/P 测试系统。启动完成后，打开 351-TT/P 测试系统的测试程序、编辑程序，编辑并保存测试程序，调用测试程序并完成联机操作，在其已完成联机的测试站的测试夹具上放置一调机样品，启动测试开关完成一次调机样品测试，检查测试结果数据，确保测试结果正确无误。启动测试数据记录工作程序并命名测试数据记录文件名（通常采用操作者代号 + 产品型号 + 生产批号等方式），完成测试数据记录准备。

② 按工作要求准备好盛装“待测品”、“合格品”、“次品”、“废品”等分类的容器，并做好标识记录。

③ 根据产品的测量工作要求，逐个测量待测产品，并做好相应数据的记录与保存工作。

④ 按工作要求分类包装完产品，填写工作记录、报告，整理并打印测试数据，清洁整理工作台面和 351-TT/P 测试系统。

⑤ 根据安全操作规程的要求，顺序关闭 351-TT/P 测试系统的各个电源开关。

4. 检测结果

1）外观检查结果

××公司

产品外观检查报告

设备型号	设备编号	检定/校准有效期	操作者	操作日期	备注
C-310	81060016	2014-12-20	…	2013-12-15	

产品检验情况

产品生产商	××公司						
产品型号	MM3Z5V1	印章标志	0A	产品质量保证等级	J		
产品生产批号	J1312001	数量	100 只	负极标志或引出端识别	√		
机械缺陷	毛边	毛刺	飞边	附着物	划痕	变形	
	1	0	2	0	1	2	
光学缺陷	麻点	变色					
	1	1					
产品合格数	92 只						
其　他							

报告审核人：　　审核日期：2013-12-16　　部门：品质保障部

2）外形尺寸检测结果

××公司

产品外形尺寸报告

设备型号	设备编号	检定/校准有效期	操作者	操作日期	备注
TYY-210	81060018	2014-12-20	…	2013-12-15	

产品检验情况

产品生产商		××公司							
产品型号		MM3Z5V1	印章标志		0A	产品质量保证等级			J
产品生产批号		J1312001	数量		3 只	负极标志或引出端识别			√
参数代码：		A	B	C	D	H	J	K	
规范要求：		1.55~1.75	1.15~1.35	0.80~1.00	0.25~0.40	0.00~0.10	0.09~0.18	2.30~2.70	
产品编号	1	…	…	…	…	…	…	…	
	2	…	…	…	…	…	…	…	
	3	…	…	…	…	…	…	…	
平均值（$\bar{x}$）		…	…	…	…	…	…	…	
标准偏差（s）									
产品合格数		3							
其　他：									

报告审核人：　　审核日期：2013-12-16　　部门：品质保障部

3）电参检测结果

××公司

产品电参检测报告

设备型号	设备编号	检定/校准有效期	操作者	操作日期	备注
351-TT/P	81060019	2014-12-20	…	2013-12-15	
JYS2960F	81060021	2014-12-20	…	2013-12-15	

产品检验情况

产品生产商		××公司			
产品型号	MM3Z5V1	印章标志	0A	产品质量保证等级	J
产品生产批号	J1312001	数量	3 只	负极标志或引出端识别	√
参数代码：	V_Z	I_R	R_Z	r_{ZK}	
测试条件：	I_Z = 5.0 mA	V_R = 2.0 V	$I_Z = I_{ZT}$ = 5.0 mA	I_Z = 1.0 mA	
规范要求	最小值	4.8			
	最大值	5.4	2.0	60	500
	单位	V	μA	Ω	Ω
产品编号	1	…	…	…	…
	2	…	…	…	…
	3	…	…	…	…
平均值（$\bar{x}$）		…	…	…	…
标准偏差（s）		…	…	…	…
产品合格数		3			
其　他					

报告审核人：　　审核日期：2013-12-16　　部门：品质保障部