

高压硅堆 技术



国防工业出版社

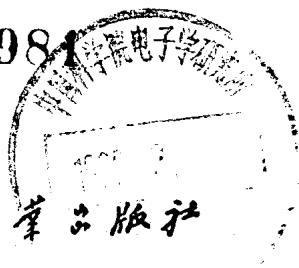
737521
127

高压硅堆技术

天津师范学院物理系 编

110798

国防工业出版社



DT07/22

内 容 简 介

本书内容分为两部分。第一部分包括第一章和第二章，比较系统地讨论了高压硅二极管的几个主要参数，并作了定量分析、计算，指出了提高元件性能的途径；第二部分包括第三、四、五章，讨论了高压硅堆的应用。其中前两章讨论了高压硅堆在实际应用中所遇到的两个主要问题——强迫均压和过流、过压的保护问题，最后一章则介绍了几种比较典型的应用实例。

本书可供从事半导体元件制造、应用的工人、技术人员和相应的院校师生参考。

高 压 硅 堆 技 术

天津师范学院物理系 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山西新华印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张8⁷/₁₆ 175千字

1977年9月第一版 1978年11月第二次印刷 印数：09,001—21,000册

统一书号：15034·1572 定价：0.89元

目 录

第一章 高压硅整流元件的设计基础	9
第一节 能级、能带; 电子、空穴的统计分布规律	10
§ 1.1 半导体中的能级、能带	10
§ 1.2 分布函数与费米能级	15
§ 1.3 半导体中载流子的浓度	18
§ 1.4 非平衡载流子, 寿命, 复合中心	23
§ 1.5 电子和空穴的扩散与漂移	28
§ 1.6 连续性方程与泊松方程	30
第二节 二极管的整流特性	31
§ 1.7 PN 结的伏安特性	31
§ 1.8 萧克莱公式、正偏压二极管的等效电路	36
§ 1.9 PN 结的反向电流密度	40
§ 1.10 N ⁺ N 结和 P ⁺ P 结	43
第三节 PIN 二极管的正向压降	46
§ 1.11 PIN 二极管正向压降的一般特性	46
§ 1.12 高注入时的正向压降	51
附录 PIN 二极管在高注入时正向压降的计算公式	51
第四节 PN 结的体雪崩击穿与二极管的反峰压	60
§ 1.13 PN 结的体击穿	61
§ 1.14 雪崩击穿过程的定量化	63
§ 1.15 空间电荷区的宽度与场强	64
§ 1.16 PN 结的势垒电容	70
§ 1.17 P ⁺ N 或 N ⁺ P 结的体雪崩击穿电压的计算	71

§ 1.18	线性缓变结体雪崩击穿电压的计算	73
§ 1.19	PSN 二极管体雪崩击穿电压的计算	76
§ 1.20	PSN 二极管体雪崩击穿时的负阻效应	78
§ 1.21	直流负阻特性所引起的电流集中 效应与毁灭性击穿	81
§ 1.22	PN 结的击穿形成时间	83
§ 1.23	PN 结的表面击穿与表面保护	86
第五节	硅整流元件的温度特性	89
§ 1.24	二极管的正、反向功率损耗	90
§ 1.25	整流器功耗所引起的结温升、热阻	92
§ 1.26	硅整流二极管的热稳定性	95
§ 1.27	本征导电温度对最高结温的限制	101
第二章	硅整流元件的暂态过程与开关特性	104
第一节	PN 结型二极管的暂态过程与开关特性	104
§ 2.1	PN 结型二极管的正向暂态过程与开关特性	104
§ 2.2	PN 结型二极管的反向暂态过程与开关特性	109
第二节	硅 PIN、PSN 二极管的暂态过程	115
§ 2.3	硅 PIN 二极管由正向导通突然转至 反向的暂态过程	115
§ 2.4	硅 PSN 二极管的反向暂态过程	121
§ 2.5	PSN 二极管中少子寿命的测量方法	124
第三节	掺金硅的特性	128
§ 2.6	掺金对寿命的影响	128
§ 2.7	掺金对电阻率的影响	131
§ 2.8	金在硅中的扩散机构与分布	133
§ 2.9	金杂质对硅整流元件特性的影响	135
第三章	硅堆的电压分布与均压问题	138
第一节	串联二极管链上电压分布的计算与均压	139
§ 3.1	高压硅堆反向运行时的等效电路	139

§ 3.2	$C_h = 0$ 、 $R_j = \infty$ 时, 硅堆的电压分布与均压问题	141
§ 3.3	二极管反向电阻对电压分布的影响	151
§ 3.4	考虑对高压端分布电容 ($C_h \neq 0$) 时 硅堆的反压分布	157
§ 3.5	均压元件的选择	168
§ 3.6	多组次级变压器	171
第二节	电压分布和均压问题的实验研究	173
§ 3.7	试品结构与实验电压	174
§ 3.8	分布电压的测量方法	174
§ 3.9	实验项目与实验结果	176
§ 3.10	实验结果与分析	183
第四章	高压硅堆的过流过压保护	185
第一节	过流及其保护	186
§ 4.1	过流产生的原因与短路电流的计算	186
§ 4.2	硅堆的过载特性	193
§ 4.3	硅堆的过电流保护	197
	一、短路保护	198
	二、过载保护	201
第二节	过压及其保护	204
§ 4.4	过压产生的原因及其幅值的大小	204
§ 4.5	硅堆的过压保护	206
	一、操作过压的保护	207
	二、故障过压保护	210
	三、换相过压保护	211
	四、大气过压保护	212
第五章	高压硅堆的实际应用	218
§ 5.1	静电除尘与石油脱水	218
§ 5.2	直流高压测试	233
§ 5.3	静电喷漆	237

§ 5.4 高频高压倍加器与绝缘磁芯变压器.....	245
§ 5.5 高能航空点火器.....	254
§ 5.6 其他.....	257

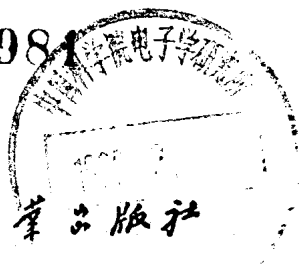
737521
127

高压硅堆技术

天津师范学院物理系 编

110798

国防工业出版社



DT07/22

内 容 简 介

本书内容分为两部分。第一部分包括第一章和第二章，比较系统地讨论了高压硅二极管的几个主要参数，并作了定量分析、计算，指出了提高元件性能的途径；第二部分包括第三、四、五章，讨论了高压硅堆的应用。其中前两章讨论了高压硅堆在实际应用中所遇到的两个主要问题——强迫均压和过流、过压的保护问题，最后一章则介绍了几种比较典型的应用实例。

本书可供从事半导体元件制造、应用的工人、技术人员和相应的院校师生参考。

高 压 硅 堆 技 术

天津师范学院物理系 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山西新华印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张8⁷/₁₆ 175千字

1977年9月第一版 1978年11月第二次印刷 印数：09,001—21,000册

统一书号：15034·1572 定价：0.89元

前 言

高压硅整流堆（简称高压硅堆）是在本世纪五十年代末、六十年代初发展起来的一种新型高压整流元件。它与先前的旋转式机械整流器、真空二极管及硒堆相比，有许多独特的优点。如整流效率高、体积小、重量轻、使用寿命长、机械强度高等。所以，在短短的近十几年中，不论是在元件的制造方面，还是在元件的应用方面，均得到了迅速的发展。在我国，经过伟大的无产阶级文化大革命，广大工农兵群众在毛主席革命路线指引下，在高压硅堆技术方面，积累了很多宝贵的实际经验。为了使这些经验更好地为我国的社会主义革命和社会主义建设服务，我们遵照伟大领袖毛主席“**要认真总结经验**”的教导，在院、系党组织的正确领导下，拜工农兵为师，向实践学习，初次编写了这本《高压硅堆技术》。

根据实际需要，本书着重讨论了改进高压硅整流元件性能的途径与合理使用元件中遇到的几个主要问题。在叙述中力求阐明问题的物理本质，避免过于繁杂的数学推导，但另一方面也不回避事物间必要的数量关系。因为只有这样才能更好地掌握事物的本质。

由于我们马列主义、毛泽东思想学习得不够好，业务水平有限，书中缺点、错误之处一定不少。我们恳切希望读者批评指正。

在本书的编写过程中，我们曾得到西安交通大学电机系、

西安高压电器研究所和上海、天津、河北、南京等省市的许多工、矿、学校、研究单位的热情帮助和大力支持；清华大学电力系、南开大学物理系的有关同志详细审阅了书稿，提出了一系列宝贵意见，在此我们一并表示衷心的感谢。

目 录

第一章 高压硅整流元件的设计基础	9
第一节 能级、能带; 电子、空穴的统计分布规律	10
§ 1.1 半导体中的能级、能带	10
§ 1.2 分布函数与费米能级	15
§ 1.3 半导体中载流子的浓度	18
§ 1.4 非平衡载流子, 寿命, 复合中心	23
§ 1.5 电子和空穴的扩散与漂移	28
§ 1.6 连续性方程与泊松方程	30
第二节 二极管的整流特性	31
§ 1.7 PN 结的伏安特性	31
§ 1.8 萧克莱公式、正偏压二极管的等效电路	36
§ 1.9 PN 结的反向电流密度	40
§ 1.10 N ⁺ N 结和 P ⁺ P 结	43
第三节 PIN 二极管的正向压降	46
§ 1.11 PIN 二极管正向压降的一般特性	46
§ 1.12 高注入时的正向压降	51
附录 PIN 二极管在高注入时正向压降的计算公式	51
第四节 PN 结的体雪崩击穿与二极管的反峰压	60
§ 1.13 PN 结的体击穿	61
§ 1.14 雪崩击穿过程的定量化	63
§ 1.15 空间电荷区的宽度与场强	64
§ 1.16 PN 结的势垒电容	70
§ 1.17 P ⁺ N 或 N ⁺ P 结的体雪崩击穿电压的计算	71

§ 1.18	线性缓变结体雪崩击穿电压的计算	73
§ 1.19	PSN 二极管体雪崩击穿电压的计算	76
§ 1.20	PSN 二极管体雪崩击穿时的负阻效应	78
§ 1.21	直流负阻特性所引起的电流集中 效应与毁灭性击穿	81
§ 1.22	PN 结的击穿形成时间	83
§ 1.23	PN 结的表面击穿与表面保护	86
第五节	硅整流元件的温度特性	89
§ 1.24	二极管的正、反向功率损耗	90
§ 1.25	整流器功耗所引起的结温升、热阻	92
§ 1.26	硅整流二极管的热稳定性	95
§ 1.27	本征导电温度对最高结温的限制	101
第二章	硅整流元件的暂态过程与开关特性	104
第一节	PN 结型二极管的暂态过程与开关特性	104
§ 2.1	PN 结型二极管的正向暂态过程与开关特性	104
§ 2.2	PN 结型二极管的反向暂态过程与开关特性	109
第二节	硅 PIN、PSN 二极管的暂态过程	115
§ 2.3	硅 PIN 二极管由正向导通突然转至 反向的暂态过程	115
§ 2.4	硅 PSN 二极管的反向暂态过程	121
§ 2.5	PSN 二极管中少子寿命的测量方法	124
第三节	掺金硅的特性	128
§ 2.6	掺金对寿命的影响	128
§ 2.7	掺金对电阻率的影响	131
§ 2.8	金在硅中的扩散机构与分布	133
§ 2.9	金杂质对硅整流元件特性的影响	135
第三章	硅堆的电压分布与均压问题	138
第一节	串联二极管链上电压分布的计算与均压	139
§ 3.1	高压硅堆反向运行时的等效电路	139

§ 3.2	$C_h = 0$ 、 $R_j = \infty$ 时, 硅堆的电压分布与均压问题	141
§ 3.3	二极管反向电阻对电压分布的影响	151
§ 3.4	考虑对高压端分布电容 ($C_h \neq 0$) 时 硅堆的反压分布	157
§ 3.5	均压元件的选择	168
§ 3.6	多组次级变压器	171
第二节	电压分布和均压问题的实验研究	173
§ 3.7	试品结构与实验电压	174
§ 3.8	分布电压的测量方法	174
§ 3.9	实验项目与实验结果	176
§ 3.10	实验结果与分析	183
第四章	高压硅堆的过流过压保护	185
第一节	过流及其保护	186
§ 4.1	过流产生的原因与短路电流的计算	186
§ 4.2	硅堆的过载特性	193
§ 4.3	硅堆的过电流保护	197
	一、短路保护	198
	二、过载保护	201
第二节	过压及其保护	204
§ 4.4	过压产生的原因及其幅值的大小	204
§ 4.5	硅堆的过压保护	206
	一、操作过压的保护	207
	二、故障过压保护	210
	三、换相过压保护	211
	四、大气过压保护	212
第五章	高压硅堆的实际应用	218
§ 5.1	静电除尘与石油脱水	218
§ 5.2	直流高压测试	233
§ 5.3	静电喷漆	237

§ 5.4 高频高压倍加器与绝缘磁芯变压器.....	245
§ 5.5 高能航空点火器.....	254
§ 5.6 其他.....	257

第一章 高压硅整流元件的设计基础

半导体硅二极管具有单向导电性,故可用作整流元件。对于一个理想整流元件的要求是:元件的正向阻抗为零,而反向阻抗则趋于无穷大(反向电流为零);其次,元件的正、反向“开”、“闭”动作应与外加电信号完全一致;最后,整流元件的性能应不受温度影响。

自然,任何实际的整流元件都不可能完全达到上述要求。一个二极管的正向阻抗虽然小,但总存在(通常以正向压降来描述),于是元件本身就要消耗功率而发热,这就限制了元件的正向通流能力。同样,当二极管上加以反压时,总有一定的反流存在。特别是,当反压超过一定限度后,反流急剧增大,出现所谓击穿现象。此时二极管失去了单向导电性,并可能完全毁坏。再有,实际的整流元件在外加电压(电流)从正向转为反向的瞬间,或从反向转为正向的瞬间,二极管并不能立即从导通转为截止,或从截止立即转为导通状态。即其“开”、“闭”动作有一滞后现象。对于高压硅整流元件,通常由正向导通转至反向截止的“滞后”现象,更为明显。这对于整流元件的工作是很不利的。特别是,在高频、数字或自控线路中,更会引起一些严重后果。

另外,半导体二极管的整流特性受温度影响很大。当二极管的结温超过一定范围后,元件的整流性能变坏,或完全失效;同时二极管的寿命也要降低,甚至完全损毁。

实际的硅整流元件的性能，通常由以下参数描述：

1. 正向平均整流电流强度 I_f ;
2. 正向平均压降 V_f ;
3. 额定反峰压值 V_r ;
4. 反向平均电流强度 I_r ;
5. 反向恢复时间 t_r 。

我们应不断提高整流元件的工作性能，使之愈益接近理想整流元件的要求，以便更好地为三大革命实际服务。要做到这一点，就必须掌握半导体二极管内在诸因素的特性与相互联系，努力“使自己的思想合于客观外界的规律性。”

第一节 能级、能带；电子、空穴的统计分布规律

§ 1.1 半导体中的能级、能带

半导体是靠体内的自由电子和空穴导电的，因此首先应弄清半导体内电子和空穴的运动规律。

大家知道，物质原子中的电子，只能在核外一定的分离轨道上运动，如图 1.1 (a) 中的 1、2、3 等。离核最近的轨道“1”上的电子的能量最低，记为 E_1 ；离核越远能量越高，

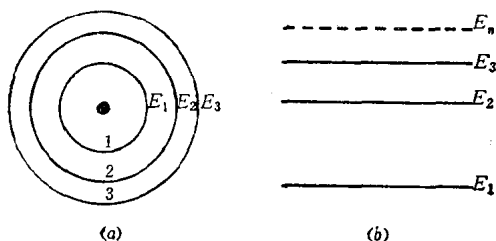


图1.1 核外电子的轨道、能级示意图