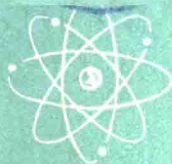


核动力工程中的 半导体测量和控制设备

[苏联] B.B.巴夫洛夫 著

孙 晶 译

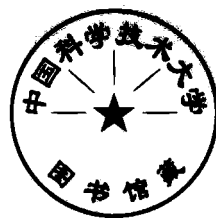


中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编辑
中 国 工 业 出 版 社 出 版

核动力工程中的 半导体测量和控制设备

〔苏联〕B. B. 巴夫洛夫 著

孙 晶 译



中国工业出版社

В. В. Павлов
**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Госатомиздат Москва 1962

* * *
**核动力工程中的
半导体测量和控制设备**

孙 晶 译

*
中国科学院原子核科学委员会编委会编辑

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路西10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*
开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $6^{2/8}$ ·插页1·字数155,000

1965年9月北京第一版·1965年9月北京第一次印刷

印数0001—1,170·定价(科六)1.00元

*
统一书号: 15165·4076(核委-55)

前 言

核动力装置，只有在各个控制、操纵和防护系统均可靠工作的情况下，才能充分有效和安全的运转。这些系统大部分都是用电子元件制成的。核反应堆和物理实验室的电子学技术，是一个庞大而又十分重要的科学领域。对于这一领域的发展应给予极大的注意。

近年来，由于采用了半导体元件，核电子学技术开始发生重大的变化。用各种半导体元件代替真空管、接触继电器和磁性放大器，就可以大大改善电子设备的使用性能和经济指标，而主要是能提高设备的工作可靠性、降低能量消耗和减小体积。

最近几年来，在苏联国内外的期刊中，发表过许多文章描述用半导体元件制成的核电子学技术的一些个别组件、设备和仪器。这些文章只是论述了利用半导体元件来改进核反应堆和物理实验室电子学技术的某些方面。

本书的目的是指出在核动力工程、物理实验以及利用放射性物质有关的各技术部门所用的电子设备中，应用半导体器件的巨大可能性和广阔的前途。因此书中把半导体设备同著名的电子管和继电器设备进行了比较。同时本书的叙述，在一定程度上也带有讨论的性质。虽然半导体电子学已取得巨大的成就，但是一些工程物理学家仍然怀疑在核动力工程电子设备中广泛应用半导体元件的可能性。作者希望通过本书在某种程度上也能对这一部分人有所帮助。

本书阐明了与制造核反应堆和物理实验用的电子设备有关的一些主要工程技术问题，即卢伊-德布洛依（Луи де Бройль）

IV

将其列入《工程艺术》^①范围内的一些問題。

在本书中，討論了用于反应堆和各种物理实验的半导体设备的設計和工程計算方法。书中对于上述设备中用半导体元件装成的各个部件和組件給予了极大的注意。本书是供工程技术人員使用的，因而书中包括許多計算实例和根据使用半导体器的工作經驗而提出的一些具体意見。

由于大部分半导体电路（脉冲放大器、触发器、正弦和方波振荡发生器等）的描述和計算，在专门文献中已叙述得非常全面，所以本书只是研究这些电路在我們要討論的范围内的一些特点。但是在半导体电子学中，还存在着很多尚未弄清的問題，所以作者在叙述有关內容时，在許多情况下只能給出初步的結果或仅仅指出工作的方向。

还应当考虑到，半导体电子学同核动力技术一样，正在日益蓬勃的发展，因此书中的某些計算方法可能很快就会过时。鉴于此种原因，部分資料只帶有定性的意义。

本书各章章末均列有参考文献目录。在这些文献中对有关資料作了比較詳細的叙述。

本书的对象是从事核动力工程和其他与应用放射性物质有关的各部門中的电子学设备的研究、設計和操作的工程师和技术人員。也可供有关高等院校和中等技术学校相应专业的学生参考。

对于在核技术中应用半导体器件有关的問題作系統地闡述，本书还是首次嘗試。缺点在所难免，作者衷心希望讀者提出批評指正。

① Гози М., Кахан Т. Управление ядерными реакторами. М., Атомиздат, 1960.

所用符号及意义

- A —— 常数;
 α —— 共基极电路中集电极短路时三极管的电流放大系数;
 α_0 —— 激活能温度系数;
 $\alpha_{\text{反向}}$ —— 三极管反接时的 α ;
 β —— 三极管在共发射电路中的电流放大系数;
 C —— 电容;
 C_c —— 集电极电容;
 D —— 扩散系数;
 d —— 直径, 长度;
 ΔE_0 —— 室温下本征电导区的激活能;
 Δf —— 频带宽度;
 E —— 能量;
 $E_{\text{电源}}$ —— 电源电压;
 $E_{\text{偏压}}$ —— 偏压;
 E_x —— 霍耳电场强度;
 $e = 2.71828$ —— 自然对数底;
 $e_{\text{电子}} = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑 —— 电子电荷;
 Φ —— 中子通量 (中子/厘米²·秒);
 F —— 内噪声系数;
 f_a —— 电流放大 (α) 截止频率;
 f_c —— 极限振荡频率;
 h_{11} —— 输出端短路时的输入阻抗;
 h_{12} —— 输入端开路时输入电压和输出电压之比;
 h_{21} —— 输出端短路时的电流放大系数;
 h_{22} —— 输入端开路时的输出导纳;
 $h(t)$ —— 过渡特性;
 I —— 直流电流;
 I_0 —— 基极回路电流;
 $I_{\text{输入}}$ —— 输入回路电流;
 $I_{\text{输出}}$ —— 输出回路电流;

- I_c —— 集电极迴路电流；
 $I_{c, \text{最大}}$ —— 集电极迴路最大电流；
 $I_{c, 0}$ —— 集电极结的反向电流；
 $I_{e, \dots, 0}$ —— 共发射极电路中通过三极管的反向电流；
 I_0 —— 电流中的直流分量；
 $I_{\text{剩余}}$ —— 剩余电流；
 $I_{\text{开关}}$ —— 开关电流；
 I_γ —— 由 γ 辐照所产生的电流；
 i —— 交流电流；
 i_w —— 噪声电流；
 $k = 8.7 \times 10^{-5}$ 电子伏/°K —— 玻耳兹曼常数；
 k_i —— 电流放大系数；
 k_p —— 功率放大系数；
 k_u —— 电压放大系数；
 $k_{\text{变换}}$ —— 变换系数；
 $k_{\text{电子-空穴}}$ —— 载流子的浓度；
 L —— 基区中少数载流子的扩散长度；
 λ —— 热力学系数；
 m —— 电子质量；
 μ —— 载流子的迁移率；
 N_s —— 陷阱浓度；
 n —— 电子浓度；
 P_c —— 集电极耗散功率；
 $P_{c, \text{最大}}$ —— 集电极最大耗散功率；
 P_e —— 发射极耗散功率；
 p —— 空穴浓度；
 R —— 电路中的外电阻；
 R_c —— 基极迴路电阻；
 $R_{\text{输入}}$ —— 电路的输入电阻；
 R_c —— 集电极迴路电阻；
 R_s —— 信号源的内阻；
 R_n —— 负荷电阻；

- $R_{\text{反馈}}$ ——反馈迴路电阻；
 R_e ——发射极迴路电阻；
 $R_{\text{热阻}}$ ——半导体热敏元件的电阻；
 R_t ——热系数（“热阻”）；
 R_X ——霍耳系数；
 r ——三极管等效电路中的电阻；
 r_o ——基极等效电阻；
 r_n ——集电结的微分电阻；
 r_e ——发射结的微分电阻；
 S ——放大器的稳定系数；
 σ ——电导，电导率；
 T ——绝对温度（°K）；
 $T_{\text{介质}}$ ——周围介质温度；
 T_n ——结温度；
 $T_{\text{最大}}$ ——最大温度；
 t_w ——脉冲宽度；
 t_ϕ ——脉冲前沿；
 $t_{\text{开关}}$ ——开关时间；
 τ ——载流子寿命；
 U ——直流电压；
 U_{o0} ——基极起始偏压；
 $U_{\text{输入}}$ ——输入电压；
 $U_{\text{输出}}$ ——输出电压；
 U_n ——集电极结上的电压；
 $U_{n\text{最大}}$ ——集电极最大电压；
 $U_{\dots\text{最大}}$ ——集电极-基极级的最大电压；
 $U_{\dots\text{最大}}$ ——集电极-发射极的最大电压；
 U_n ——负载上的电压；
 $u_{\text{剩余}}$ ——剩余电压；
 $u_{\text{噪声}}$ ——噪声电压；
 U_e ——发射极结的电压；
 $U_{e\text{基}}$ ——发射极-基极结的电压；
 u ——交流电压；

X

V_e —— 电子运动速度;

w_0 —— 基区宽度;

y_{11} —— 输出端短路时的输入导纳;

y_{12} —— 输出端短路时的反向过渡导纳;

y_{21} —— 输出端短路时的正向过渡导纳;

y_{22} —— 输入端短路时的输出导纳。

目 录

前 言

所用符号及意义

第一章 引言 1

 参考文献 9

第二章 核辐射对半导体器件的影响 11

 1. 实验研究 11

 讨论结果 18

 2. 基本理论 20

 3. 结束语 27

 参考文献 27

第三章 核动力工程中用的半导体二极管和三极管的

 基本类型 29

 1. 高频二极管和三极管 29

 2. 开关二极管和三极管 35

 3. 大功率二极管和三极管 39

 4. 稳压二极管 40

 5. 隧道二极管 42

 6. 专用半导体元件 43

 7. 结束语 46

 参考文献 47

第四章 用半导体二极管和三极管装制的测量仪器的

 基本部件 48

 1. 核动力工程和物理实验用的测量仪器的

 基本部件 48

 2. 半导体辐射探测器 51

 3. 脉冲放大器和整形器 57

VI

4. 半导体三极管放大器的内噪声	70
5. 幅度甄别器	76
6. 计数电路	78
7. 计数率计	91
8. 符合和不符合分析器	93
9. 直流放大器	95
直流耦合式放大器	96
直流变交流的半导体变换器	101
交流放大器	114
相灵敏整流器	123
小信号直流放大器的计算实例	125
10. 电源	131
11. 专用电路	140
参考文献	144

第五章 用半导体二极管和三极管装配的反应堆控制

设备的基本部件	149
1. 控制系统的结构	149
2. 监测设备	149
3. 调节设备	158
4. 事故防护设备	174
5. 反应堆的电子模型	182
参考文献	185

第六章 半导体技术的发展趋向

参考文献	201
------------	-----

第一章 引言

在核动力工程和实验核物理中，广泛应用各种各样的电子仪器。专用的电子设备是核动力装置中控制和防护系统的一个最重要的组成部分。无线电电子学对于现代野外剂量测定，具有同样特殊重要的意义。

测量放射性用的电子仪器，在各工业部门、农业和与利用放射性同位素有关的科学实验中，得到了越来越广泛的应用。

设计核动力工程用的电子线路问题，是一个复杂而独特的问题，在苏联国内和国外的文献中^[1-7]，都发表过大量的文章专门讨论这个问题。

核动力工程的发展以及放射性同位素在国民经济和科学研究中的广泛应用，要求制造出一些既操作简便、工作可靠而又经济适用的电子仪器。然而现有的真空管电子仪器远没有完全满足这些要求。

因此最近几年来，大家对于在核动力工程、物理实验室和利用放射性同位素的各个技术部门所用的电子设备中，能否采用半导体器件的问题，感到极大兴趣，这是不足为奇的。

到目前为止，在核动力工程和物理实验所用的电子设备中，作为有源元件只是利用了真空电子管和磁性放大器，而作为开关元件利用了电动继电器。半导体器件，例如二极管、三极管和多电极开关管等，比起电子管、磁性放大器和继电器来说，具有一系列十分重要的优点。

虽然从制造出第一个实验室半导体三极管以来，仅过了约15年，但目前的半导体电子学已达到了相当高的发展水平^①。实际

● 第一个用锗制成的点接触半导体三极管是在1948年；1952年出现了面结型锗三极管，在1954年开始工业生产硅三极管。

上，工业成批生产的半导体三极管，并不比同类用途的真空管有所逊色。因为半导体器件的使用期限较长、尺寸小得多，而且又比较经济，故它比电子管更为优越。

最近几年来，在苏联国内外的一些文献中，对于半导体二极管和三极管比起与其相应的真空管、充气管、电动继电器和磁性放大器的一些主要优点，已进行了细致的分析，并且目前这些特点已为众所公认⁽⁸⁻¹⁰⁾。所以在本书中不再详细地讨论这些优点；而为了便于比较，只是提出一些表征电子管和半导体仪器的有关数据。

表1中列出了用不同类型的现代真空管（三极管）和以成批制造的半导体三极管装配成的一个“平均化”放大器的主要参数。由表可知，现代半导体放大器比起用现代最小型电子管装配成的放大器来说，其体积只有后者的二分之一到三分之一，重量为五分之一到十分之一，电源能量损耗约为十分之一，而使用期限却延长约一个数量级。

应当指出，半导体电子学正在快速发展，表1中所列出的半导体放大器的数据是根据1961年年中的资料，每年这些数据都有极大的变化。在第六章里将讨论这些变动的基本方向。

表 1

放大器中所用元件的类型	体 积 (厘米 ³)	重 量 (克)	能量消耗 (瓦)	平均使用 期 限 (千小时)
一般电子管(6H8型)	150	120	2~3	5
小型电子管	60~70	50~60	1.5~2.5	5
超小型电子管	12~15	20~30	1.5~2	5
半导体三极管	4~7	3~8	0.1~0.2	50

目前半导体技术已拥有一整套的整流、放大和开关元件，可以保证使测量和计算技术、自动化技术、遙控力学和其他技术部门内的所有主要问题，都获得解决；而在过去，这些问题都是借

助于真空管和电动继电器来解决的。

最近几年来，各种半导体器件（主要是二极管和三极管），在计算机和信息设备、工业自动化、测量和遥测设备、通信设备中等，都得到了广泛的使用。

半导体器件的一个主要优点是其潜在工作可靠性极高。此外，它们的特点是：体积小、结构简单牢固、没有磨损（“老化”）零件，并且由于其工作电压低和没有灯丝，因而电源能量消耗低。

半导体二极管和三极管的广泛采用，解决了计算机和控制机、轻便测量仪（电池供电）和其他仪器中的一系列迫切的工程技术问题，但如果在这样的仪器中应用真空电子管，那就会遇到许多的困难。

半导体元件代替真空电子管的过程，进行得很快。有些专家倾向于认为，在广泛应用电子元件的测量和计算技术、自动化技术、遥控力学以及其他部门中，用半导体元件来代替电子管，是一项“技术革命”。当用半导体三极管代替电子管时，在电子设备中所经历的变动，实质上是使设备的使用特性和经济指标得到极大的改进；提高工作可靠性、缩小体积、降低使用经费等。可以预期不久的将来，电子设备的基本组成部分将由半导体元件所构成。

对核动力工程和物理实验来说，用半导体元件代替电子管和电动继电器，同样具有重大的意义。因为这能提高应用于这些部门中的控制和测量装置的工作可靠性，并装配出简单而价格又低廉的轻便野外剂量仪等。还在半导体技术发展的头几年，就已经进行了关于制备供这些部门用的实验半导体仪器的研究工作，并且已得到了肯定的结果⁽¹⁰⁻¹⁴⁾。

因此可以预料到，在核动力工程的电子仪器中，半导体元件将会同样得到广泛地应用。

应当指出，“晶体管化”的过程，当然不会导致真空电子管和其他电子放大和开关元件的完全“衰亡”。在过高的工作温度

和在超高频波段内得到大功率，例如在加速器的无线电工程系统中某些特殊方面，电子管仍旧会得到应用。

在研制和设计电子仪器时，需要合理地把半导体器件和其他放大与开关电子元件结合起来。

在有些情况下，可以同时应用电子管和半导体三极管，例如前置放大器的输入级用电子管，而在输出级和主放大器中则用半导体三极管。联合使用半导体三极管和磁性放大器，以及在某些场合下，联合使用半导体三极管和触发电动继电器，其效果同样十分良好。

半导体元件的一个明显的优点是，在大多数情况下，用真空管装成的电子设备改用半导体元件，其工作原理和总布局不会发生重大改变。

利用半导体器件能够得到一系列原则上的新方案，但在许多情况下，用这些元件装成的电子设备，就其电路原理来说，与同类真空管电路十分相近。基于半导体三极管的各种系统的一般计算，例如反应堆的控制、调节或者防护系统等，在很大程度上类似于基于同类电子管系统的计算。这就大大减轻了把原子能动力工程用的电子设备改为半导体元件的这样一个任务。按事情的实质而论，与其说这个任务是原则性的，还不如说它是工程技术性的，因为这里只不过需要克服工程计算和设计上的一些困难而已。

当然，这并不意味着可以单纯机械地用半导体元件代替电子管。半导体元件还有一系列独特的地方，也正是因为有这些特点，尽管从表面布局来看，用半导体元件与用同类电子管是相似的，但两者的电路却有重大的区别。

这些特点首先是：半导体器件是受电流控制的器件，其参数和特性随电路的工作状态，特别是随周围介质温度而变，并特殊地与放射性辐照强度有关。

在一系列苏联国内外的文献中⁽¹⁵⁻¹⁷⁾已详细地论述过各种半导体元件的工作原理和随之而产生的独有特点。

我們所以对这些特点感到兴趣，是基于下述观点：即在計算和設計核动力工程和物理研究用的各种电子設備的时候，需要考虑这些特点。

半导体三极管与真空电子管的一个主要区别是，半导体三极管的輸入阻抗一般都比較低，并且按輸入迴路而言，它所消耗的是电流^①。因此半导体三极管是靠輸入电流（更正确地說，是靠輸入功率）来控制的，而电子管則是用电位来控制的。这个特点就是在計算半导体电路和电子管电路时有着很大区别的一个原因。例如在計算一个半导体放大器时，其中一个主要参数是該电路前一級或者信号源所需要的輸入电流。按照应用最为广泛的共发射极电路装成的一級小功率測量放大器的輸入阻抗值，在大多数情况下是500~1500欧姆。而操纵功能电动机用的一級功率放大器的輸入电阻，总共只有几个欧姆。所以在試制半导体放大仪器时所产生的主要技术問題之一，是得到高的輸入阻抗，从而和輻射探测器的高阻輸出相匹配。

在討論剂量仪（第四章）用的和反应堆控制系統（第五章）用的半导体放大器时，对于得到高輸入阻抗的問題，将給予很大的注意。

半导体器件的参数与周围介质溫度有关，因而需要采取相应措施使半导体电路恒温化，这就是半导体元件的另一个重要特点，它使半导体仪器的計算和設計复杂化。参数和溫度的依賴关系是半导体的一个基本性能：当溫度改变时，半导体的大多数主要物理参数（激活能，載流子迁移率和浓度等）也随之而变化，这本身就引起了半导体器件电特性的变化。

半导体晶体的加热能引起一系列的效应。当溫度增高时，晶格振动加强，晶格常数也随之而改变。因而引起了能带边緣的移动和激活能的相应变化。激活能 ΔE_0 对环境溫度 T ($^{\circ}\text{K}$) 的依

① 某些用电場和磁場控制的半导体器件除外。它們的輸入阻抗接近于同类真空管的数值。因为它們比一般三极管应用得少，所以本书后面在遇到有关它們的应用問題时，将特別加以說明。

賴关系，可以近似地用下式表示：

$$\Delta E_a = \Delta E_{a0} - \alpha_a T \quad (1)$$

載流子的迁移率同样也与溫度有关，并且在很大的溫度范围内，这个依賴关系具有冪性质：

$$\mu_{\text{电子-空穴}}(T) = \alpha_{\text{电子-空穴}} T^{-\theta_{\text{电子-空穴}}} \quad (2)$$

式中 $\alpha_{\text{电子-空穴}}$ 和 $\theta_{\text{电子-空穴}}$ ——載流子（电子或空穴）的迁移率和溫度变化系数。

最后，半导体中的載流子浓度以及电导（所謂本征电导）也随溫度而变。由热激发产生的电子-空穴对的浓度对溫度的依賴关系是按指数定律而变化。锗的这个依賴关系可以用下列公式来表示：

$$k = 4.5 \times 10^{19} \exp(-4390/T) \quad (3)$$

这个依賴关系的主要表现之一是，当溫度有变动时，由本征电导制約的电流也起变化：在二极管中是反向电流 $I_{\text{反向}}$ ，而在三极管中是集电极的反向电流 I_{k0} 。 I_{k0} 对周围介质的依賴关系为：

$$I_{k0}(T) = (I_{k0})_0 \exp\left(\frac{e_{\text{电子}} U}{k T} - 1\right) \quad (4)$$

对锗三极管来说，大約每经过 11°C ，其 I_{k0} 值就增加一倍。而硅三极管，則每經 5.5°C ，其 I_{k0} 值才增加一倍。而此时的內阻值却相应地减小。

当半导体元件工作在模拟状态下，例如在脉冲线性测量放大器和直流放大器中，溫度稳定性的問題就具有很大的意义。也正是在这种工作状态下，需要采取一些特別細致的溫度稳定措施。但当半导体元件在断續状态下（所謂开关状态下）工作时，溫度稳定性的問題就不起那么重要的作用。开关状态能在很大程度上减少半导体元件的其他一些缺点，而同时又能在最大程度內發揮它的优越性。因此，目前的半导体元件大多是用在开关状态下。例如：在数字计算机、数字测量和遙测系統的甄別調节等設備中，半导体元件就是在开关状态下工作。