

面 結 型 晶 体 管 导 論

〔美国〕 R. D. 密特布洛克 著

17

尙 辰 化 譯



國防工業出版社

內 容 簡 介

本书从对晶体管的结构和电子及空穴在晶体中的运动定性与定量的討論讲起，在这个基础上逐步地討論了晶体管作用的基本原理。

全书分为三个部分。第一部分根据能带理論討論了半导体鍺和硅的晶体结构及与其有关的諸問題。第二部分論述了求解随外加电压和材料物理参量而变化的 $p-n$ 結 和 $p-n-p$ (或 $n-p-n$) 晶体管中的电流問題。第三部分集中地闡述了晶体管小訊号性能的电路表示法。在这部分里还补充討論了有关面結型晶体管基础理論的一些問題。

本书适于从事半导体器件制造和科研工作的技術員和工程師閱讀，也可供相应专业的大专师生参考。

AN INTRODUCTION TO
JUNCTION TRANSISTOR THEORY
〔美国〕 R. D. Middlebrook
JOHN WILEY AND SONS, INC.

1957

面 結 型 晶 体 管 导 論

尙 辰 化 譯

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 $9\frac{1}{16}$ 230千字

1966年4月第一版 1966年4月第一次印刷 印数：0,001—3,500册

統一书号：15034·1088 定价：(科六) 1.40元

原 序

第二次世界大战以后，电子器件理論和应用获得了巨大的进展，这些进展主要是应用物理学家和电机工程师們共同努力的結果。在电子学获得最近的迅速发展以前，电机工程师接受的是一般工程的基本訓練，在大学課程行将結束之前，才分門別類地熟悉“电力”或“电子”电机工程两个专业。

对“电子”电机工程师來說这种訓練已經不再合适。通常在学完电机工程学基础課程后所学习的麦克斯韦方程，現在却仅是学习行波管的重要課題的出发点。近代电子学专家的成长，在今天依靠应用物理学家要比依靠电机工程师的成份多些。为了了解行波管而必須熟悉的电磁理論，只不过是近代电子工程师需要增加基本科学知識的一个例子。固体物理以前仅是应用物理学家和冶金学家研究的領域，而随着晶体管的发展它却成了电子学的一部分。

或許有一天晶体管物理知識也会像今日的真空管物理知識一样，对于实用工程人員变为不再需要。但是，我相信，除非他們至少具备了晶体管工作原理的一些知識，否則，他們是不能将晶体管和有关固体器件的巨大潜力挖掘出来的，因为晶体管本身在两个主要方面要比真空管更为复杂。第一，真空管的作用区是在真空中，而晶体管的作用区則在固体中；电子在真空中运动的基本知識是每个电机工程师标准訓練的一部分，而质点在固体中的运动，則是十分不熟悉的概念。第二，普通真空管大多用于渡越時間效应可以忽略的頻率范圍，而晶体管中的渡越時間效应甚至

在声頻也很重要。

虽然电子工程师应具备一些关于晶体管如何和为何工作的概念，但他們不一定要熟知固体物理学更高深的方面，而掌握这方面的知識則要具备波动力学的知識。这个領域最好留給关心固体器件的設計而不管其使用的应用物理学家。

在本书中，試图对晶体管有兴趣的电子工程师提供一个理解晶体管是“如何”和“为何”工作的基础。

本书从晶体結構和电子在晶体中的运动的定性討論讲起，定量的討論則是基于統計力学和量子力学的两个結論展开的。在此基础上逐步介紹晶体管作用的基本原理，由此得出晶体管小訊号

的电路表示法，这种表示是以物理原理为基础的，它可使用于实际应用中而不必考虑所依据的理論。

本书分为三部分。

在第一部分中，根据能帶理論討論了鍺和硅（制造晶体管常用的两种元素）的晶体結構；引入了半导体中电子流和空穴流的概念，并在假定費米-狄拉克分布公式和在导帶及价帶中有效量子态密度的公式是正确的基础上，推导出半导体中的运动电子濃度和空穴濃度的公式；介紹了鍺和硅在室溫热平衡状态的特殊情況下，根据电导的知識，决定其迁移載流子濃度和費米能級的方法。电子和空穴电流流动的方程和連續方程是根据物理原理求得的。最后，用两种不同的方法导出正向p-n結中注入的少数載流子濃度随外加电压变化的边界条件。

在第二部分中，用第一部分中导出的公式求解随外加电压和材料物理參量而改变的p-n結和p-n-p晶体管中的电流。首先求加上直流电压时的电流，再求小訊号迭加在使标准晶体管放大器工作所需极性的直流偏压上的电流。然后引入集电結空間电荷层的展寬效应，并借助拉普拉斯变换法再求解电压为任意波形时用外加电压表示的各项电流。最后，得出一个交流等效电路，等效电路的元件是以晶体管材料的物理參量表示的。

在第三部分中，將注意力集中在第二部分得出的小訊号等效电路上。求出等效电路的元件在晶体管有用的整个頻率範圍內均适用的近似值，然后将等效电路变换为实际应用更方便的形式。在这最后的等效电路中，所給出的元件值是以对一个制成的晶体管所作的六个測量值来表示的，所以即使不知道晶体管的物理参量，也能实际使用晶体管。列出的实验結果表明：最后的等效电路無論在定性上还是在定量上都是正确的。

鉴于曾經提出过許多面結型晶体管等效电路，因此，有必要証明第三部分所作的一些假設是正确的。在試圖建立一种等效电路之前，人們首先会提出下列两个問題：为什么需要等效电路？理論精确性和便于实际应用之間要作多大程度的折衷？因为当处理任何复杂器件时，这样的折衷是不可避免的。

面結型晶体管最恰当的等效电路的形式，可能随以下的一种或数种使用方法的的不同而有所差別：小訊号或大訊号，低頻或高頻，窄帶或寬帶，小功率或大功率，是否是开关应用。此外，可以得到很精确的等效电路的表示法，但是，使用起来太麻煩，或者为了简化起見，在等效电路中可能包括很多近似值，以致实际使用起来不够良好。

曾經提出了多种面結型晶体管的等效电路，它們在应用範圍和复杂程度上各走极端。本书中討論的等效电路試圖建立一种便于实际应用的表示方法，它适合在晶体管的全部可用頻率範圍內用来設計小訊号放大器。实验結果表明，对于上述目的而言，这个等效电路在实用上是足够精确的。它的优点應該从上述观点来判断，而不在于它是否是一种理論上的精确表示。

把本书的内容限于上面指出的範圍內，是为了使从最初的几个原理出发的逐步推导可以得到实用的小訊号等效电路，而不用离开本题去討論許多变化形式，不过它們对于更精确地研究和发展許多其他理論方面（推导不同的等效电路和大訊号表示）是必需的。

第一部分的材料是所有半导体器件的基础；第二部分的材料虽然是针对 $p-n$ 结和 $p-n-p$ 晶体管而言的，但也适用于 $n-p-n$ 晶体管，而其变化形式则适用于其他类型的结构；第三部分仅限于讨论许多小信号等效电路中的一种等效电路。第一和第二部分的材料可认为是面结型晶体管的标准基本原理，但是等效电路的表示法远非标准表示法。第三部分中的等效电路在以前未曾发表过，在这部分中也不打算列举文献中可找到的其他表示方法。除去用最简便的形式说明晶体管可如何使用以外，也不讨论线路应用。

本书对愿意了解晶体管工作原理的大学生和电机工程师们是有用的。

R. D. 密特布洛克

目 录

原序	3
符号表	11

第 一 部 分

第一章 緒論	20
1.1 历史背景	21
1.2 点接触晶体管	23
1.3 p-n 結整流器和面結型晶体管	25
1.4 改进的面結型晶体管結構	29
1.5 面結型晶体管的制造	30
第二章 面結型晶体管理論定性的发展	36
2.1 晶体結構	36
2.2 p-n 結整流器	40
2.3 p-n-p 晶体管	42
2.4 晶体管基区中电流流动的机理	44
2.5 面結型晶体管的交流等效电路	46
第三章 定性的半导体物理学	51
3.1 經典和量子力学理論的結論; 能級	52
3.2 晶体結構; 能帶	53
3.3 絕緣体、导体和半导体	56
3.4 电子在晶体中的运动	57
3.5 本征半导体	59
3.6 n型杂质半导体	61
3.7 p型杂质半导体	63
第四章 定量的半导体物理学	65

4.1 費米-狄拉克分布函数	66
4.2 迁移载流子浓度的确定	68
4.3 費米能级的确定	71
4.4 用对本征状态能级的偏离表示的载流子浓度	73
4.5 用电导率表示的载流子浓度	74
4.6 实际应用的公式	77
4.7 关于少数载流子的浓度	80
第五章 半导体中电流的流动	82
5.1 在 n 型和 p 型载流半导体中迁移载流子的分布	83
5.2 在载流的 $p-n$ 結中迁移载流子的分布	88
5.3 扩散电流	93
5.4 連續方程	95
5.5 正向偏压下 $p-n$ 結中电流的求解方法	97
第六章 正向偏压下 $p-n$ 結的边界值	100
6.1 热平衡下 $p-n$ 結的能带图	100
6.2 热平衡下 $p-n$ 結中电流流动的趋势	103
6.3 外加正向电压下 $p-n$ 結的能带图	107
6.4 注入载流子浓度的边界条件: 第一种方法	109
6.5 注入载流子浓度的边界条件: 第二种方法	112
6.6 物理基础	115
第 二 部 分	
第七章 外加直流电势下的 $p-n$ 結	120
7.1 少数载流子浓度的連續方程的解	120
7.2 少数载流子电流方程	123
7.3 电流形式的討論	124
7.4 $p-n$ 結的整流特性	127
7.5 正向偏压下准費米能级的形状	128
7.6 反向直流电势下 $n-p$ 結中的电流	129
7.7 反向偏压下准費米能级的形状	132
第八章 $p-n-p$ 晶体管	134
8.1 $p-n-p$ 晶体管的定性討論	134

8.2	基区中直流空穴浓度和空穴电流的表达式	135
8.3	基区中空穴浓度和空穴电流的分布	137
8.4	p-n-p 晶体管中的总偏流	140
8.5	对交流讯号求連續方程的解	143
8.6	发射极效率、轉移因数和集电区倍增因数	146
8.7	简化的低频等效电路	149
8.8	晶体管放大器的功率增益和截止频率	151
第九章 内部电容、高频和反饋效应		156
9.1	生长結晶体管的集电区空間电荷电容	157
9.2	合金結晶体管的集电区空間电荷电容	161
9.3	集电区空間电荷层的展寬	164
9.4	扩散电抗	168
9.5	发射区和集电区电导率的选择; I_{c0}	172
第十章 p-n-p晶体管的通解		177
10.1	集电区边界位置的变化对集电区边界值的影响	177
10.2	基区中連續方程的解	180
10.3	发射极和集电极的空穴电流; 本征晶体管的等效电路	185
第十一章 扩散导納的近似式		192
11.1	近似式的所需形式	193
11.2	对 m 参数和 T 参数的求法	195
11.3	α^i 与频率的关系	198
11.4	α^i 的瞬态响应	203
11.5	扩散导納的近似式	206
第十二章 完整的小訊号交流等效电路		210
12.1	多数载流子的基极电阻效应	210
12.2	基极电压发生器的分析	213
12.3	完整的小訊号交流等效电路	219
12.4	小訊号交流等效电路的典型值	222
12.5	其它等效电路的表示法	225

第 三 部 分

第十三章 实际应用的交流等效电路	232
------------------------	-----

13.2	变换公式	234
13.3	实际晶体管的变换导納	236
13.4	供实际应用的元件公式的简化	243
13.5	实用公式	247
13.6	实际应用中所需公式的摘要	252
13.7	结果的实验验证	253

面 結 型 晶 体 管 导 論

〔美国〕 R. D. 密特布洛克 著

17

尙 辰 化 譯



國防工業出版社

內 容 簡 介

本书从对晶体管的结构和电子及空穴在晶体中的运动定性与定量的討論讲起，在这个基础上逐步地討論了晶体管作用的基本原理。

全书分为三个部分。第一部分根据能带理論討論了半导体鍺和硅的晶体结构及与其有关的諸問題。第二部分論述了求解随外加电压和材料物理参量而变化的 $p-n$ 結 和 $p-n-p$ (或 $n-p-n$) 晶体管中的电流問題。第三部分集中地闡述了晶体管小訊号性能的电路表示法。在这部分里还补充討論了有关面結型晶体管基础理論的一些問題。

本书适于从事半导体器件制造和科研工作的技術員和工程師閱讀，也可供相应专业的大专师生参考。

AN INTRODUCTION TO
JUNCTION TRANSISTOR THEORY
〔美国〕 R. D. Middlebrook
JOHN WILEY AND SONS, INC.

1957

面 結 型 晶 体 管 导 論

尙 辰 化 譯

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 9 $\frac{1}{16}$ 230千字

1966年4月第一版 1966年4月第一次印刷 印数：0,001—3,500册

統一书号：15034·1088 定价：(科六) 1.40元

原 序

第二次世界大战以后，电子器件理論和应用获得了巨大的进展，这些进展主要是应用物理学家和电机工程师們共同努力的結果。在电子学获得最近的迅速发展以前，电机工程师接受的是一般工程的基本訓練，在大学課程行将結束之前，才分門別類地熟悉“电力”或“电子”电机工程两个专业。

对“电子”电机工程师來說这种訓練已經不再合适。通常在学完电机工程学基础課程后所学习的麦克斯韦方程，現在却仅是学习行波管的重要課題的出发点。近代电子学专家的成长，在今天依靠应用物理学家要比依靠电机工程师的成份多些。为了了解行波管而必須熟悉的电磁理論，只不过是近代电子工程师需要增加基本科学知識的一个例子。固体物理以前仅是应用物理学家和冶金学家研究的領域，而随着晶体管的发展它却成了电子学的一部分。

或許有一天晶体管物理知識也会像今日的真空管物理知識一样，对于实用工程人員变为不再需要。但是，我相信，除非他們至少具备了晶体管工作原理的一些知識，否則，他們是不能将晶体管和有关固体器件的巨大潜力挖掘出来的，因为晶体管本身在两个主要方面要比真空管更为复杂。第一，真空管的作用区是在真空中，而晶体管的作用区則在固体中；电子在真空中运动的基本知識是每个电机工程师标准訓練的一部分，而质点在固体中的运动，則是十分不熟悉的概念。第二，普通真空管大多用于渡越時間效应可以忽略的頻率范圍，而晶体管中的渡越時間效应甚至

在声頻也很重要。

虽然电子工程师应具备一些关于晶体管如何和为何工作的概念，但他們不一定要熟知固体物理学更高深的方面，而掌握这方面的知識則要具备波动力学的知識。这个領域最好留給关心固体器件的設計而不管其使用的应用物理学家。

在本书中，試图对晶体管有兴趣的电子工程师提供一个理解晶体管是“如何”和“为何”工作的基础。

本书从晶体結構和电子在晶体中的运动的定性討論讲起，定量的討論則是基于統計力学和量子力学的两个結論展开的。在此基础上逐步介紹晶体管作用的基本原理，由此得出晶体管小訊号

的电路表示法，这种表示是以物理原理为基础的，它可使用于实际应用中而不必考虑所依据的理論。

本书分为三部分。

在第一部分中，根据能帶理論討論了鍺和硅（制造晶体管常用的两种元素）的晶体結構；引入了半导体中电子流和空穴流的概念，并在假定費米-狄拉克分布公式和在导帶及价帶中有效量子态密度的公式是正确的基础上，推导出半导体中的运动电子濃度和空穴濃度的公式；介紹了鍺和硅在室溫热平衡状态的特殊情況下，根据电导的知識，决定其迁移載流子濃度和費米能級的方法。电子和空穴电流流动的方程和連續方程是根据物理原理求得的。最后，用两种不同的方法导出正向p-n結中注入的少数載流子濃度随外加电压变化的边界条件。

在第二部分中，用第一部分中导出的公式求解随外加电压和材料物理參量而改变的p-n結和p-n-p晶体管中的电流。首先求加上直流电压时的电流，再求小訊号迭加在使标准晶体管放大器工作所需极性的直流偏压上的电流。然后引入集电結空間电荷层的展寬效应，并借助拉普拉斯变换法再求解电压为任意波形时用外加电压表示的各项电流。最后，得出一个交流等效电路，等效电路的元件是以晶体管材料的物理參量表示的。

在第三部分中，將注意力集中在第二部分得出的小訊号等效电路上。求出等效电路的元件在晶体管有用的整个頻率範圍內均适用的近似值，然后将等效电路变换为实际应用更方便的形式。在这最后的等效电路中，所給出的元件值是以对一个制成的晶体管所作的六个測量值来表示的，所以即使不知道晶体管的物理参量，也能实际使用晶体管。列出的实验結果表明：最后的等效电路無論在定性上还是在定量上都是正确的。

鉴于曾經提出过許多面結型晶体管等效电路，因此，有必要証明第三部分所作的一些假設是正确的。在試圖建立一种等效电路之前，人們首先会提出下列两个問題：为什么需要等效电路？理論精确性和便于实际应用之間要作多大程度的折衷？因为当处理任何复杂器件时，这样的折衷是不可避免的。

面結型晶体管最恰当的等效电路的形式，可能随以下的一种或数种使用方法的的不同而有所差別：小訊号或大訊号，低頻或高頻，窄帶或寬帶，小功率或大功率，是否是开关应用。此外，可以得到很精确的等效电路的表示法，但是，使用起来太麻煩，或者为了简化起見，在等效电路中可能包括很多近似值，以致实际使用起来不够良好。

曾經提出了多种面結型晶体管的等效电路，它們在应用範圍和复杂程度上各走极端。本书中討論的等效电路試圖建立一种便于实际应用的表示方法，它适合在晶体管的全部可用頻率範圍內用来設計小訊号放大器。实验結果表明，对于上述目的而言，这个等效电路在实用上是足够精确的。它的优点應該从上述观点来判断，而不在于它是否是一种理論上的精确表示。

把本书的内容限于上面指出的範圍內，是为了使从最初的几个原理出发的逐步推导可以得到实用的小訊号等效电路，而不用离开本题去討論許多变化形式，不过它們对于更精确地研究和发展許多其他理論方面（推导不同的等效电路和大訊号表示）是必需的。

第一部分的材料是所有半导体器件的基础；第二部分的材料虽然是针对 $p-n$ 结和 $p-n-p$ 晶体管而言的，但也适用于 $n-p-n$ 晶体管，而其变化形式则适用于其他类型的结构；第三部分仅限于讨论许多小信号等效电路中的一种等效电路。第一和第二部分的材料可认为是面结型晶体管的标准基本原理，但是等效电路的表示法远非标准表示法。第三部分中的等效电路在以前未曾发表过，在这部分中也不打算列举文献中可找到的其他表示方法。除去用最简便的形式说明晶体管可如何使用以外，也不讨论线路应用。

本书对愿意了解晶体管工作原理的大学生和电机工程师们是有用的。

R. D. 密特布洛克

目 录

原序	3
符号表	11

第 一 部 分

第一章 緒論	20
1.1 历史背景	21
1.2 点接触晶体管	23
1.3 p-n 結整流器和面結型晶体管	25
1.4 改进的面結型晶体管結構	29
1.5 面結型晶体管的制造	30
第二章 面結型晶体管理論定性的发展	36
2.1 晶体結構	36
2.2 p-n 結整流器	40
2.3 p-n-p 晶体管	42
2.4 晶体管基区中电流流动的机理	44
2.5 面結型晶体管的交流等效电路	46
第三章 定性的半导体物理学	51
3.1 經典和量子力学理論的結論; 能級	52
3.2 晶体結構; 能帶	53
3.3 絕緣体、导体和半导体	56
3.4 电子在晶体中的运动	57
3.5 本征半导体	59
3.6 n型杂质半导体	61
3.7 p型杂质半导体	63
第四章 定量的半导体物理学	65