

半导体器件物理

辽河实验工厂情报资料室

1972

半导体器件物理

S. M. SZE (史西蒙) 著

辽河实验工厂《半导体器件物理翻译组》译

辽河实验工厂情报资料室

读者注意

中译本为了减少版面，将原书各章图表都按不同比例缩小影印。读者如感不便，请参阅原文。

"Physics of Semiconductor Devices"
S. M. SZE

1969 by John Wiley & Sons, Inc.

半 导 体 器 件 物 理

S. M. SZE (史 西 蒙) 著

辽河实验工厂《半导体器件物理翻译组》译
东北工学院印刷厂印刷

1972.3

毛主席语录

学习外国的东西，是为了研究和发展中国的东
西。

我们一定要有无产阶级的雄心壮志，敢于走前
人没有走过的道路，敢于攀登前人没有攀登过的高
峰。

中国应该大量吸收外国的进步文化，作为自己
文化食粮的原料，~~三三三~~但是一切外国的东西，如同
我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃
肠运动，送进唾液肠液，把它分解为精华和糟粕两
部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的
身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将
来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

第一章 引 论

1. 提 綱..... 1
2. 半导体器件的分类..... 2
3. 特殊說明..... 4

第一部分 半导体物理

第二章 半导体物理及其性质——提要

1. 引 言..... 9
2. 晶体結構..... 9
3. 能 带..... 13
4. 热平衡条件下载流子密度..... 17
(1) 本征半导体 (2) 施主和受主 (3) 费米能级的计算
5. 载流子的迁移现象..... 25
(1) 迁移率 (2) 电阻率及霍尔效应 (3) 复合过程
6. 声子譜及半导体的光学、热学及大电場性質..... 33
(1) 声子譜 (2) 光学性质 (3) 大电場性质
7. 半导体器件动作的基本方程..... 43
(1) 基本方程 (2) 简单例子

第二部分 p-n 结器件

第三章 p-n 结二极管

1. 引 言..... 53
2. 基本器件工艺..... 53
3. 耗尽区及耗尽区电容..... 58
(1) 突变结 (2) 线性缓变结
4. 电流——电压特性..... 64
(1) 理想情形—肖克莱方程 (2) 产生—复合过程 (3) 大注入条件 (4) 扩散电容
5. 结的击穿..... 73
(1) 热的不稳定性 (2) 隧道效应 (3) 雪崩倍增
6. 瞬变性能及噪音..... 82
(1) 瞬变性能 (2) 噪音
7. 端子机能..... 85
(1) 整流器 (2) 稳压器 (3) 变阻器 (4) 变抗二极管 (5) 快速恢复二极管 (6) 电荷储存二极管
8. 異 質 结..... 90

第四章 隧道二极管及反向二极管

1. 引 言..... 98
2. 重掺杂效应..... 98
3. 隧道过程..... 101
(1) 定性讨论 (2) 隧道过程几率及隧道电流
4. 过量电流..... 108

5. 掺杂、温度、电子轟击及压力所引起的电流电压关系..... 110
(1) 掺杂效应 (2) 温度效应 (3) 电子轰击、压力及其它效应
6. 等效电路..... 118
7. 反向二极管..... 120

第五章 碰撞雪崩渡越时间二极管(IMPATT 二极管)

1. 引 言..... 126
2. 静态特性..... 127
(1) 击穿电压 (2) 雪崩区和漂移区 (3) 温度及空间电荷效应
3. 基本动态特性..... 135
(1) 雪崩区 (2) 漂移区及总阻抗
4. 普适的小信号分析..... 139
(1) 动态量 (2) 基本解 (3) 一般解
5. 大信号分析..... 146
(1) 功率—频率限制 (2) 基本的碰撞电离雪崩渡越时间模式 (3) 高效率碰撞电离雪崩渡越时间模式
6. 噪 音..... 150
7. 实 驗..... 152
(1) 二极管几何结构 (2) 微波测量 (3) 没有耗尽的外延层及热耗损的影响

第六章 结型晶体管

1. 引 言..... 163
2. 静态特性..... 163
(1) 基本电流—电压特性 (2) 电流增益 (3) 共基极连接 (4) 共发射极连接
3. 微波晶体管..... 173
(1) 器件的几何结构 (2) 截止频率 (3) 高频特性
4. 功率晶体管..... 181
(1) 一般考虑 (2) 二次击穿
5. 开关晶体管..... 185
6. 单结晶体管..... 189

第七章 p-n-p-n 及结型场效应器件

1. 引 言..... 198
2. p-n-p-n 二极管及半导体可控整流器..... 199
(1) 基本特性 (2) α 随电流变化 (3) 一般电流—电压特性 (4) 触发方法 (5) 正向及反向阻断特性 (6) 瞬变动作
3. 结型场效应晶体管及限流器..... 209
(1) 基本特性 (2) 特殊电荷分布 (3) 静态特性 (4) 动态特性 (5) 限流器

第三部分 界面及薄膜器件

第八章 金属—半导体器件

1. 引 言..... 223

2. 蕭脫基效应..... 223
3. 金屬—半导体接触处的能带关系..... 225
 - (1) 理想条件及表面态 (2) 耗尽层 (3) 势垒高度的一般式子
4. 蕭脫基势垒中的电流输运理论..... 231
 - (1) 热电子发射理论 (2) 扩散理论 (3) 热电子发射扩散理论 (4) 少数载流子注入比
5. 蕭脫基势垒高度测量..... 240
 - (1) 电流—电压测量 (2) 电容—电压测量 (3) 光电测量
6. 箝位晶体管, 蕭脫基栅场效应晶体管及金屬半导体雪崩 (IMPATT) 二极管..... 250
 - (1) 箝位晶体管 (2) 蕭脫基势垒栅场效应晶体管 (3) 金屬—半导体雪崩 (IMPATT) 二极管
7. 莫特势垒, 点接触整流器及欧姆接触..... 252
 - (1) 莫特势垒 (或穿通势垒) (2) 点接触整流器 (3) 欧姆接触
8. 空间电荷限制二极管..... 255

第九章 金属—绝缘体—半导体二极管

1. 引言..... 230
2. 理想的金属—绝缘体—半导体 (MIS) 二极管..... 260
 - (1) 表面空间电荷区 (2) 理想 MIS 曲线
3. 表面态, 表面电荷及空间电荷..... 270
 - (1) 表面态 (2) 电容法 (3) 电导法 (4) 表面电荷绝缘体中的空间电荷
4. 金属功函数, 晶体取向, 温度, 光照及辐射对 MIS 特性的影响..... 282
 - (1) 金属功函数效应 (2) 晶体取向效应 (3) 温度效应 (4) 光照效应 (5) 辐射效应
5. 表面变抗, 雪崩, 隧道及电致发光 MIS 二极管..... 288
 - (1) MIS 表面变抗管 (2) 半导体表面上的雪崩及隧道效应, MIS 发光二极管 (3) 绝缘体中的隧道效应及 MIS 隧道二极管
6. 绝缘膜中的载流子输运..... 296

第十章 绝缘栅场效应晶体管及有关的表面效应

1. 引言..... 303
2. 在非平衡条件下的表面空间电荷区..... 307
3. 沟道电导..... 310
4. 基本器件特性..... 311
5. 一般特性..... 316
 - (1) 电流—电压特性 (2) 器件参量 (3) 等效电路及绝缘栅场效应晶体管的种类 (4) 共栅连接 (5) 温度, 掺杂及其他影响 (6) 绝缘栅场效应晶体管的物理限制
6. 用蕭脫基势垒接触作源极及漏极的绝缘栅场效应晶体管..... 326
7. 有深置栅的绝缘栅场效应晶体管——一种

- 儲存器件..... 328
8. 表面电场对 T-n 结及金属—半导体器件的影响..... 331
 - (1) 电容及反向电流 (2) 击穿电压

第十一章 薄膜器件

1. 引言..... 338
2. 绝缘栅薄膜晶体管 (TFT)..... 338
 - (1) 基本特性 (2) 陷阱及表面态效应 (3) 功率限制
3. 热电子晶体管..... 349
 - (1) 金属中的热电子 (2) 晶体管的比较 (3) 半导体—金属—半导体晶体管 (4) 隧道发射器件
4. 金属—绝缘体—金属结构..... 361

第十二章 光电子器件

1. 引言..... 369
2. 电致发光器件..... 369
 - (1) 辐射跃迁 (2) 发射光谱 (3) 发光效率 (4) 激发方法 (5) 砷化镓红外光源
3. 太阳电池..... 377
 - (1) 基本特性 (2) 光谱响应 (3) 复合电流及串联电阻 (4) 辐射效应
4. 光电探测器..... 383
 - (1) 光电导体 (2) 耗尽层光电二极管 (3) 雪崩光电二极管

第十三章 半导体激光器

1. 引言..... 403
2. 半导体激光器物理..... 404
 - (1) 跃迁过程 (2) 直接及间接禁带半导体 (3) 分布反转 (4) 增益 (5) 轴向波型
3. 结型激光器..... 410
 - (1) 器件制造 (2) 阈值电流密度 (3) 频谱分布 (4) 空间分布 (5) 应力效应、磁场效应、时间延迟及激光器的衰退
4. 其它泵源及激光器材料..... 423
 - (1) 光源 (2) 电子束泵 (3) 雪崩击穿 (4) 激光器材料

第五部分 体效应器件

第十四章 体效应器件

1. 引言..... 430
 2. 微分体内负阻..... 430
 - (1) 基本特性 (2) 雪崩复合低温开关
 3. RWI 机构..... 435
 - (1) 定性分析 (2) 速度—电场特性
 4. 根氏振荡器及各种工作模式..... 439
 - (1) 基本判据 (2) 累积层模式 (3) 偶电层模式 (4) 限制空间电荷累积 (简称限累, ISA) 模式 (5) 利用 RWI 机构的其它器件
 5. 有关的体效应器件..... 454
 - (1) 敏热电阻 (2) 霍尔器件
- 物理常数表..... 8

第一章 引 論

1. 提 綱

本書的內容共分成五部分：

- 第一部分 半导体物理及性質提要，
- 第二部分 p-n 結器件，
- 第三部分 界面及薄膜器件，
- 第四部分 光電子器件，
- 第五部分 體效應器件。

第一部分包括在第二章中，其中扼要敘述了材料的性質，以之作為理解及計算本書中要談到的各種器件的特性的基礎；扼要綜述了載流子分布及其輸運性質，重點放在三種最重要的材料上：鎘，硅，砷化鎳。在第二章中以圖表的方式介紹了有關這些材料的最近的及最精確的數據。

第三章到第七章為第二部分，討論有一個或多個相互作用的 p-n 結的器件。第三章討論經典的中等電場的 p-n 結。這種討論無論對於 p-n 結本身以及作為更複雜器件的一個部分來說都是基本的。當結的兩邊摻雜很重，因而使結中的電場高到足以產生隧道效應時，我們就得到隧道二極管性能的新特點（第四章）。當結在雪崩擊穿中工作時，在適當的條件下，我們可得到一個能產生微波輻射的碰撞雪崩渡越時間（以下簡稱雪崩）(IMPATT)二極管（第五章）。第六章討論結型晶體管，也就是說，兩個緊密耦合的結之間的相互作用，它是最重要的一種半導體器件。其它結型器件在第七章中討論，其中包括 p-n-p-n 三結器件以及結型場效應晶體管，後者利用結電場來控制與結平行的電流而不是與結垂直的電流。

第八章到第十一章是第三部分，這裡討論半導體与其它材料之間的界面。與金屬的界面，特別是蕭脫基勢壘在第八章中討論。蕭脫基二極管的電性能與單邊突變 p-n 結相似，但是它可以作為一種多數載流子器件工作而且具有最快的響應。金屬—絕緣體—半導體器件及有關的絕緣體—半導體界面的表面物理在第九章及第十章中討論。這種“表面態”的知識不僅對器件本身很重要，而且與所有其它半導體器件的穩定性及可靠性都有關聯。第十一章討論一些薄膜及熱電子器件，這些器件也屬於界面器件一類。

第十二章及第十三章為第四部分，討論光電子器件。這類器件可以探測、產生光能量并把光能量轉換成電能或反之。我們將在第十二章中討論各種光探測器及太陽電池。第十三章則專門討論一種最重要的光電子器件：半導體激光器。

第十四章為第五部分，討論所謂“體效應”器件，主要是有關能谷間轉移機構的器

件（根氏振盪器及 LSA(限累)振盪器）。这些器件的动作原理与 p-n 結或界面无关，但是它們都要在相当高的电場下工作，因而第十四章主要討論速度-电場的关系及各种工作模式。

在討論每种器件时，都首先簡短地回顧了有关某一种器件或某一类密切相关的器件的发明及演变的历史事实，然后討論器件的特性及物理原理。我們予定每一章或多或少是各自独立的，使教員或讀者能根据他們自己的計劃来選擇或安排章次。

关于符号的說明：为了保持所用符号簡單，需要不止一次地重复使用同一簡單的符号，它們在不同的器件中具有不同的意义。例如符号 α 在結型晶体管中表示共基极电流增益，在光探测器中表示光学吸收系数而在雪崩(IMPATT)二极管中則表示电子碰撞电离系数。这种使用符号的方法要比其它方法更方便，例如，如果 α 只能使用一次，則其它量必須被迫使用更复杂的符号。然而在每一章內，每种符号只能有一种意义，它的意义在它第一次出現时就加以規定。在整个本书中，有許多符号具有相同或相似的意义，为参考方便起见，把它們集中在表 1.1 中。

2. 半導体器件的分类

在上一节中，我們曾經把半导体器件按材料的組合（如单独的半导体，或金屬、半导体及絕緣体的組合）及材料的性質（如光学性質或能谷間轉移性質）来分类。我們使用这种分类是因为这样可以在本书中把半导体器件排成一个有規則的次序。

基本符号表

表 1.1

符 号	名 称	单 位	符 号	名 称	位 单
a	点陣間距	埃	F(E)	費米-狄拉克分布函数	
\mathcal{A}	磁 感 应	韦伯/米 ²	h	普郎克常数	焦耳·秒
c	自由空間中的光速	厘米/秒 [*]	$h\nu$	光子能量	电子伏
C	电 容	法拉	I	电 流	安培
\mathcal{D}	电 位 移	庫伦/厘米 ²	I_C	收集极电流	安培
D	扩散系数	厘米 ² /秒	J	电流密度	安培/厘米 ²
E	能 量	电子伏	J_t	总值电流密度	安培/厘米 ²
E_C	导带底部	电子伏	k	波茲曼常数	焦耳/°K
E_F	費米能級	电子伏	kT	热 能	电子伏
E_g	禁带寬度	电子伏	L	长 度	厘米或微米
E_V	价带頂部	电子伏	m_0	自由电子質量	公斤
\mathcal{E}	电 場	伏/厘米	m^*	有效質量	公斤
\mathcal{E}_c	临界电場	伏/厘米	\bar{n}	折 射 率	
\mathcal{E}_m	最大电場	伏/厘米	n	自由电子密度	厘米 ⁻³
f	頻 率	赫芝(每秒周)	n_i	本征密度	厘米 ⁻³

表 1.1 (續)

符 号	名 称	单 位	符 号	名 称	单 位
N	掺杂杂质浓度	厘米 ⁻³	∇	微分算符	
N _A	受主杂质浓度	厘米 ⁻³	∇T	温度梯度	°K/厘米
N _C	导带中能态的有效密度	厘米 ⁻³	ϵ_0	自由空间电容率	法拉/厘米
N _D	施主杂质浓度	厘米 ⁻³	ϵ_s	半导体电容率	法拉/厘米
N _V	价带中能态的有效密度	厘米 ⁻³	ϵ_i	绝缘体电容率	法拉/厘米
p	自由空穴密度	厘米 ⁻³	ϵ_s/ϵ_0 或 ϵ_i/ϵ_0	介电常数	
P	压 力	达因/厘米 ²	τ	寿命或衰减时间	秒
q	电子电荷	库伦	θ	角 度	弧度
Q _{ss}	表面态密度	电荷/厘米 ²	λ	皮 长	微米或埃
R	电 阻	欧姆	ν	光的频率	赫芝
t	时 间	秒	μ_0	自由空间导磁率	亨利/厘米
T	绝对温度	°K	μ_n	电子迁移率	厘米 ² /伏-秒
v	载流子速度	厘米/秒	μ_p	空穴迁移率	厘米 ² /伏-秒
v _{s2}	散射极限速度	厘米/秒	ρ	电阻率	欧姆-厘米
v _{th}	热速度 ($\sqrt{3kT/m}$)	厘米/秒	ϕ	势垒高度或米费	伏
V	电 压	伏	ϕ_{Bn}	n 型半导体上的蕭脱基 势垒高度	伏
V _{bi}	内建电势	伏	ϕ_{Bp}	p 型半导体上的蕭脱基 势垒高度	伏
V _{EB}	发射极-基极电压	伏	ϕ_m	金属功函数	伏
V _B	击穿电压	伏	ω	角频率 ($2\pi f$ 或 $2\pi\nu$)	赫芝
W	厚 度	厘米或微米	Ω	欧 姆	欧姆
W _B	基区厚度	厘米或微米			
x	x 方向				

在这一节中要介绍文献 1 建議的一种更系統的半导体器件的分类方法。这种系統可以用来划分所有已有的及未来的半导体器件，并且可以利用它来組織創造性的思考。这种系統从列举一組完整的半导体性质以及一組能改变半导体性能的外部影响（例如外加电压）开始，然后依次施加一个、两个等等的外部影响，按半导体性能不断复杂化的次序来划分半导体器件的类别。

我們將从均匀半导体（无結的体效应）开始并一次施加一种外部影响。其次是有两种、三种乃至多种外部影响的体效应器件。单个 p-n 結是不同于体效应器件的最簡單的器件，对于它们依次施加一个、两个等等的外部影响。最后我們將考虑多結器件（或界面器件）并相应地施加外部影响。表 1.2 列出了一些体效应器件，表中外部影响的符号的意义与表 1.1 相同。表 1.3 是一些重要的单結（或界面）器件。表 1.4 列出了一些最重要的多結（界面）器件。这里所列举的并没有包括所有各种可能性。然而只要扩大所列举的效应及影响，也可以同样划分其它半导体器件。

表 1.5 列出了將在本书中討論的所有器件。它們分成前述的三类。我們注意到一章

中可以包括所有三类中的器件。例如，在第七章中，我們將討論限流器（体效应），場效应二极管（单結）及結型場效应晶体管（多結）；它們之所以包括在一章內是因为这些器件的形态及特性上有相似之处。

3. 特殊說明

指出有关本书的一些想法可能是應該的。

首先电子部門特别是半导体器件部門发展的非常迅速，变化的非常快，今天的概念，明天可能就过时了。你記得下面这些“著名的定論”嗎？

“烽烟信号是最快的通信手段，它是永远不能被取代的。”

“电报是最快通信中的頂峰” 工程师杂志，1850年

“有了电子管，我們就到达了通信能力的顶点，” ——工程师杂志，1920年

“晶体管是在探求通信的快速的可靠的手段方面的最后一步。” 工程师杂志，1950年

“集成电路是頂峰了！人們可能再也不能超出这个革命性的新的概念了。” 工程师杂志，1960年……

体 效 应 器 件

表 1.2

外部影响		电极数	特 点	器 件 名 称
影响数	影响			
1	$h\nu$	0	透过某频率的光	滤 光 器
			光及电子束泵	激 光 器
	\mathcal{E}	2	$J = \sigma \mathcal{E}$	电 阻 器
			电压控制負阻	根 振 盪 器
			电流控制負阻	雪崩复合低温开关
	$\mathcal{E} > \mathcal{E}_{\text{閾值}}$ 时, $J = \text{常数}$	限 流 器		
∇T	2	西伯克效应 $\mathcal{E} \sim \nabla T$		
2	$h\nu, \mathcal{E}$	2	$J = \sigma(h\nu)\mathcal{E}$	光 电 导 体
	\mathcal{E}, \mathcal{H}	2	$J = \sigma(\mathcal{H})\mathcal{E}$	磁 电 阻 器
		4	霍尔效应 $V = f(\mathcal{H}, \mathcal{E})$	霍 尔 发 生 器
	\mathcal{E}, T	2	$J = \sigma(T)\mathcal{E}$	热 敏 电 阻
	$\mathcal{E}, \nabla T$	2	湯姆生热 $\sim \nabla T$	
\mathcal{E}, P	2	压电阻效应	应 变 計	
3	$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{H}$	3	总尔(Sah)效应	

单结 (或界面) 器件

表 1.3

外部影响		电极数	特 点	器 件 名 称
影响数	影响			
1	$h\nu$	2	光生电压效应	光电池, 太阳电池
	ϵ	2	正规的 p-n 结(p-n)	二极管, 整流器
			p-n 结用作可变电阻器	变阻器
			p-n 结用作可变电容器	变抗器
			p-n 结用作光源	电致发光二极管
			两边高掺杂的 p-n 结	隧道二极管
			有适当的高掺杂, 直接禁带跃迁, 反射表面	注入激光器
			由雪崩击穿或隧道效应限制电压	稳压器
			由碰撞、雪崩及渡越时间效应产生微波	雪崩二极管 (iMPATT)
			用作限流器的单极器件	场效应二极管
由禁带宽度不同的半导体形成的结	异质结 (n-n, i-n 及 p-p)			
金属与半导体之间的接触	肖脱基二极管, 莫特二极管, 点接触			
	∇T	2	西伯克效应	热电偶, 热电发生器
2	ϵ_1, ϵ_2	3	少数载流子注入细条中	单结晶体管 (双基板二极管)
	$\epsilon, \nabla T$	2	伯帖效应	伯帖致冷器
	$\epsilon, h\nu$	2	$J=f(\epsilon, h\nu)$	光电二极管

因此重要的是要理解基本的物理过程并且具备足够的物理及数学知识来消化、来判断并迎接这些活跃的部门的挑战。

我们也应该知道数字计算机几乎在每一个部门中都广泛使用。一台数字计算机基本上是一具更快的、更有效的及更多能的“计算尺”。利用这支计算尺，我们可以解决许多非线性问题，可以在短时间内进行几百万次计算，可以模拟动态性能并能在实验研究之前发现有用的结果。在本书中，许多理论结果及实例是利用计算机得到的。因此也希望读者对计算机的使用能有一些基本的了解。

必须指出，许多器件，特别是微波器件如雪崩二极管(IMPATT)及根振盪器目前还在积极研究中。它们的大信号性能及极限性能在目前还远远没有被完全了解。本书中所叙述的材料只是提供一个基础。希望读者用追根究底的态度查阅原来的文献以增加自己的了解而不要盲目地接受文献中所说的一切。也希望读者能参加技术会议去交换、听取并辩论技术上的想法，这样可以澄清错误的概念，激发新的想法。

集成电路不在本书中讨论。因为集成电路基本上是一种工艺。我们主要讨论构成集成电路的各种单个器件的物理及工作原理。只有在懂得了各个器件之后，我们才能作为离散元件或作为集成系统来完全利用它们。

多 结 (或界面) 器 件

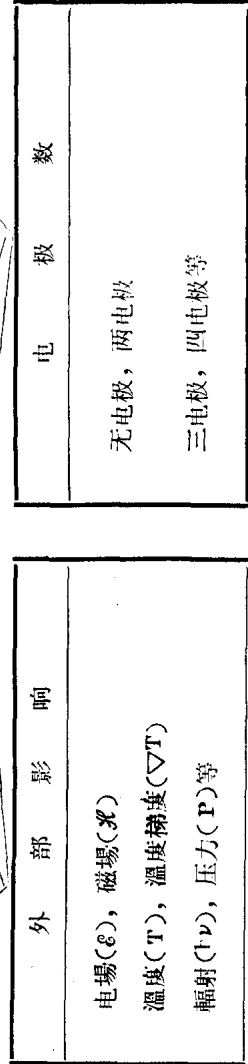
表 1.4

外部影响		电极数	特 点	器 件 名 称
影响数	影 响			
1	ϵ	2	四层 $p-n-p-n$ 二极管	肖克莱二极管
		2	金属-绝缘体-金属器件	MIM 隧道二极管
		2	金属-绝缘体-半导体器件	MIS 二极管
1 或 2	ϵ_1 及/或 ϵ_2	3	$p-n-p$ 及 $n-p-n$	结型晶体管
		3	有一个栅极的 $p-n-p-n$	半导体控制整流器 (SCR)
		3	结型单极晶体管	结型场效应晶体管 (JFET)
		3	绝缘栅场效应晶体管	绝缘栅场效应晶体管 (IGFET)
		3	有淀积半导体薄膜的薄膜晶体管	薄膜晶体管 (TFT)
	3	半导体-金属-半导体结构及其它有关结构	热电子晶体管	
	ϵ, ν	3	有人射光	光晶体管

表 1.5

半 导 体 器 件 分 类

体 效 应 器 件	单 结 (或 界 面) 器 件	多 结 (或 界 面) 器 件
<ul style="list-style-type: none"> 限流器 光电导体 用光及电子束泵激的激光器 电流控制的微分负阻体效应器件 (雪崩复合低温开关) 电压控制的微分负阻体效应器件 (共振谐振器) 霍耳器件 热敏电阻 	<ul style="list-style-type: none"> PN结：整流器，变阻器，变抗二极管，稳压管 隧道二极管，反向二极管 碰撞-雪崩-渡越时间二极管 (IMPATT 二极管) 异质结 单结晶体管 场效应二极管 金属-半导体接触：肖脱基，莫特，点接触 光子二极管：太阳能电池，光电二极管，电致发光二极管 注入激光器 	<ul style="list-style-type: none"> PNP 及 PNP 晶体管 蕭克萊二极管 (PNPN 二极管) 半导体控制整流器 (SCR) 結型場效应晶体管 (JFET) 金屬-半导体器件 金屬-絕緣体-半导体二极管 (MIS) 源阻儲存器件 絕緣柵場效应晶体管 (IGFET) 薄膜晶体管 (TFT) 热电子晶体管
<ul style="list-style-type: none"> 第7章 第12章 第13章 第14章 第14章 第14章 第14章 第14章 第14章 	<ul style="list-style-type: none"> 第3章 第4章 第5章 第3章 第6章 第7章 第8章 第8章 第12章 第13章 	<ul style="list-style-type: none"> 第6章 第7章 第7章 第7章 第8章 第9章 第10章 第10章 第11章 第11章



参 考 文 献

1. S. J. Angello, "Review of Other Semiconductor Devices," Proc. IRE, 46, 968 (1958).
2. Compiled by H. C. Spencer.

物 理 常 数 表

物 理 量	符 号	数 值
埃	\AA	$1 \text{\AA} = 10^{-4}$ 微米 = 10^{-8} 厘米 = 10^{-10} 米
阿伏伽德罗数	N_{AvO}	6.025×10^{23} 分子/克分子
波尔半径	a_B	0.53 埃
波兹曼常数	K	1.380×10^{-23} 焦耳/ $^{\circ}\text{K}$ = 8.62×10^{-5} 电子伏/ $^{\circ}\text{K}$
电子电荷	q	1.602×10^{-19} 库仑 = 4.8×10^{-10} 静电单位
电子伏	eV	1 电子伏 = 1.602×10^{-19} 焦耳 = 23.1 卡
自由电子质量	m_0	9.108×10^{-31} 公斤
自由空间电容率	ϵ_0	8.854×10^{-14} 法拉第/厘米 ($10^9/4\pi c^2$)
自由空间磁导率	μ_0	1.257×10^{-8} 亨利/厘米 ($4\pi \times 10^{-9}$)
蒲朗克常数	h	6.25×10^{-34} 焦耳-秒
简缩蒲朗克常数	\hbar	$\hbar/2\pi = 1.054 \times 10^{-34}$ 焦耳-秒
标准大气压		1.033×10^4 公斤/米 ² = 760 毫米汞柱 (托)
热电压 ($T = 300^{\circ}\text{K}$)	KT/q	0.0259 伏
自由空间中的光速	C	2.998×10^{10} 厘米/秒
相当于 1 电子伏的波长	λ	1.239 微米
密 耳		10^{-3} 英寸
微 米	μ	10^{-6} 米 = 10^{-4} 厘米 = 10^{-3} 毫米 = 10^4 埃
英 寸	"	2.54 厘米

第二章 半導體物理及其性質—提要

1. 引言

半導體器件物理自然是以半導體物理為基礎的。這一章的目的是扼要介紹半導體物理及其性質。這個提要只代表了大量半導體文獻的一個小部份；這裡要談的只是和器件動作有關的那些部份。

關於半導體物理的詳細討論，讀者可參考 Dunlap¹, Madelung², Moll³, Smith⁴ 等人的教科書。

為了能把大量知識壓縮在一章的篇幅中，我們用了四個表以及由實驗數據作出的30個以上的圖。一般都知道，在所有各種半導體中，只有元素鎘和硅得到了最深入的研究。由於砷化鎘有許多不同於鎘及硅的重要性質，特別是它的可用於激光器中的直接禁帶躍遷（豎直躍遷）及可用於產生微波的能谷之間的載流子轉移，所以近年來，對砷化鎘也進行了深入的研究。因此這一章的重點放在上述三種最重要的半導體上。

在第二節中，我們首先考慮晶體結構，因為固體的電子性質與晶格結構有密切關係。我們將複習一下密勒指數，因為實際空間中的晶面以及能量—動量空間中的動量就是用它來表示的。在第三節中，我們要討論能帶及有關參量如有效質量 m^* 及禁帶寬度 E_g 。對於大多數半導體來說，曾經發現電子在晶體中的運動與自由電子的運動十分相似，特別是對於能量靠近能量—動量空間中極小值處的電子。電子的許多性能可以用古典術語來描述，好像晶體中的電子是具有有效質量 m^* 的自由電子一樣。禁帶寬度是在 0°K 時完全被充填的價帶的頂部與 0°K 時完全空缺的導帶的底部之間的能量差。在較高溫度下，導帶中有電子而價帶中有空穴。對於多數半導體來說，電子及空穴的輸運過程可看成是彼此獨立的；總的傳導電流可簡單地看成是電子及空穴電流分量之和。

基於能帶理論的載流子密度及載流子輸運現象分別在第三第四節中討論。在各種外部影響下的半導體的其它有關性質在第六節討論，最後，在第七節中將扼要討論描述半導體器件動作的基本方程。

2. 晶體結構

對於一個結晶固體，存在三個基矢 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} ，通過用這些基矢的整數倍的和表示的任何矢量的平移之後，晶體結構保持不變。換言之，正格子中格點的位置可用一組矢量規定⁵，

$$l = ma + nb + pc \quad (1)$$

式中 m, n, p 是整数。

图 1 表示一些重要的单位晶胞(正格子)。重要的半导体多数是金刚石或闪锌矿晶格结构, 它们属于四面体型, 就是说, 每个原子被四个等距离的最近的相邻原子所包围, 它们位于四面体的角顶上。两个最近的相邻原子之间的价键是由两个自旋相反的电子形成的。金刚石及闪锌矿晶格可以看成是两个面心立方的子晶格互相贯穿而成。在金刚石晶格中, 例如硅, 所有的原子都是硅原子; 而在闪锌矿晶格中, 例如砷化镓(GaAs), 一个子晶格是镓而另一个子晶格是砷。砷化镓是一种 III-V 族化合物, 因为它是由周期表中的 III 族元素及 V 族元素组成的。大多数 III-V 族化合物的晶体是闪锌矿结构^{2, 6, 7}。然而有许多半导体(包括一些 III-V 族化合物)的晶体结构是纤维锌矿(ZnS)结构, 它们的最近邻原子也按四面体排列。

图 2 表示六角密集晶格及纤维锌矿(ZnS)晶格, 后者可看成是两个六角密集晶格互相贯穿而成。我们注意到, 象在闪锌矿晶格中那样, 纤维锌矿晶格中的每一个原子被位

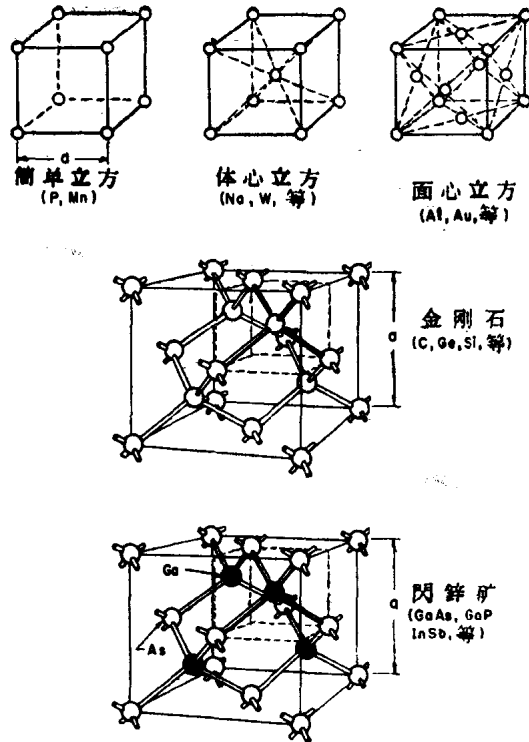


图 1 一些重要的晶胞(正格子)及其代表的元素或化合物

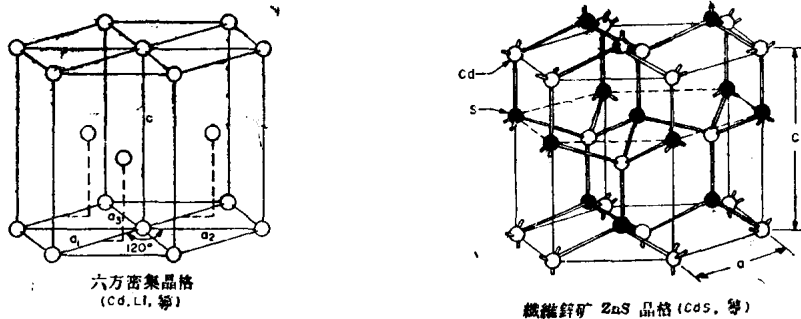


图 2 六角密集晶格及纤维锌矿晶格

于四面体的角頂上的四个等距离的最近的相邻原子所包围。一些重要的半导体的晶格常数及其晶体结构一起列于表 2.1 中。值得注意的是，有一些化合物，例如硫化锌及硫化镉可以有閃鋅矿及纖維鋅矿两种晶体结构。

已知一組正格子基矢，我們可以定义一組倒格子基矢 $\mathbf{a}^*, \mathbf{b}^*, \mathbf{c}^*$,

$$\mathbf{a}^* \equiv 2\pi \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{c}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}}, \quad \mathbf{b}^* \equiv 2\pi \frac{\mathbf{c} \times \mathbf{a}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}}, \quad \mathbf{c}^* \equiv 2\pi \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}}, \quad (2)$$

使 $\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}^* = 2\pi$, $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}^* = 0$, 等等，而一般的倒格子矢量为

$$\mathbf{g} = h\mathbf{a}^* + k\mathbf{b}^* + l\mathbf{c}^* \quad (3)$$

这里 h, k, l 是整数。

表 2.1

	元素或化合物	名 称	晶 体 结 构	300°K 的晶格常数 (埃)
元素半导体	C	碳 (金刚石)	金刚石	3.56679
	Ge	锗	金刚石	5.65748
	Si	硅	金刚石	5.43086
	Sn	灰锡	金刚石	6.4892
IV—IV	SiC	碳化硅	閃鋅矿	4.358
III—V	AlSb	銻化鋁	閃鋅矿	6.1355
	B N	氮化硼	閃鋅矿	3.615
	BP	磷化硼	閃鋅矿	4.538
	GaN	氮化鎵	纖維鋅矿	$a=3.186, c=5.176$
	GaSb	銻化鎵	閃鋅矿	6.0155
	GaAs	砷化鎵	閃鋅矿	5.6534
	GaP	磷化鎵	閃鋅矿	5.4505
	InSb	銻化銻	閃鋅矿	6.4788
	InAs	砷化銻	閃鋅矿	6.0585
	InP	磷化銻	閃鋅矿	5.8688
II—VI	CdS	硫化鋇	閃鋅矿	5.832
	CdS	硫化鋇	纖維鋅矿	$a=4.16, c=6.756$
	CdSe	硒化鋇	閃鋅矿	6.05
	ZnO	氧化鋅	立 方	4.58
	ZnS	硫化鋅	閃鋅矿	5.42
	ZnS	硫化鋅	纖維鋅矿	$a=3.82, c=6.26$
II—VI	PbS	硫化鉛	立 方	5.935
	PbTe	碲化鉛	立 方	6.460

可以証明， $\mathbf{g} \cdot \mathbf{l} = 2\pi \times \text{整数}$ ；倒格子中的每一个矢量与正格子中的一組平面垂直；倒格子中的一个单位晶胞的体积 V_c^* 与正格子中的一个单位晶胞的体积 V_c 成反比，即 $V_c^* = (2\pi)^3 / V_c$ ，这里 $V_c \equiv \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}$ 。