

# 金属半导体接触

[英] E. H. 罗德里克 著

科学出版社

# 金属半导体接触

(英) E. H. 罗德里克 著

周章文 齐学参 译

何 莘 郭自强 校

科学出版社

1984

## 内 容 简 介

本书为金属半导体接触方面的专著，主要介绍一些金属与常用半导体锗、硅、砷化镓等 III-V 族化合物之间肖特基势垒和欧姆接触的形成，势垒中的电流输运机理和势垒电容的性质，以及势垒高度等重要参数的测量方法。本书综合了近十年来的大量实验结果，并与各种理论模型进行了比较，对实际接触中通常出现的问题也进行了详细的讨论，并提出了改进措施。本书可供大专院校有关专业师生、科研生产单位有关科技人员阅读。

E. H. Rhoderick  
Metal-Semiconductor Contacts  
Clarendon Press, 1978

## 金属半导体接触

【英】E. H. 罗德里克 著

周章文 齐学参 译

何 幸 郭自强 校

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984 年 6 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1984 年 6 月 第一次印刷 印张：6 7/8

印数：0001—3,600 字数：150,000

统一书号：13031·2601

本社书号：3579·13—3

定价：1.10 元

# 前 言

自从 Henisch 的经典著作《整流半导体接触》问世以来，已经廿年了。廿年来，半导体接触问题一直是一个十分活跃的领域，这一方面是因为接触在半导体工艺中极为重要，另一方面是由于出现了新的实验技术，因而我们现在对基本接触现象比廿年前有了更深入的了解。尽管 Henisch 书中的很多内容至今仍然是恰当的，但出版一本概括廿年来发展的新书，看来是适时的。

我们不打算过于详细地论述本课题的每一方面。本书的目的是充分阐明基本原理，而对于切望更详细地探索某些专题的读者，可利用本书所提供的参考文献达到他们的目的。除讨论制备接触的方法以外，我有意不去讨论接触的实际应用。然而，我还是尽可能地阐明基本现象的实际意义。应用可以变化，但基本原理是不变的。首次接触本课题的人，可以从第一章中获得一个概貌，这一章是全书的提要，并且列有一些相互参照的章节编号，以便于读者更深入地研究某些专门的问题。

曼彻斯特大学科学技术学院电气工程和电子学系

E. H. 罗德里克

1977.4

## 符 号 表

$a$	$= [q^2 N_d / 2 \epsilon_s k T]^{\frac{1}{2}}$ [方程 (3.7)]
$A$	对应于自由电子质量的 Richardson 常数
$A^*$	对应于半导体中有效质量的 Richardson 常数 [方程 (3.11)]
$A^{**}$	经过量子力学反射和声子背散射修正的 $A^*$ 值
$b$	$\varphi_{b0}$ 的温度系数
$C$	单位面积的微分电容 ( $= dQ/dV$ )
$D_c$	电子的扩散常数
$D_b$	空穴的扩散常数
$D_s$	表面态密度 [电子伏 <sup>-1</sup> · 米 <sup>-2</sup> ]
$e_e$	单位时间内一个陷阱发射一个电子的几率
$e_h$	单位时间内一个陷阱发射一个空穴的几率
$E$	电子能量
$E_c$	半导体导带底的能量
$E_F$	费米能级
$E_F^m$	金属中的费米能级
$E_F^s$	半导体中的费米能级
$E_g$	半导体的带隙
$E_i$	半导体的本征费米能级
$E_t$	陷阱能量
$E_V$	价带顶能量
$E_0$	由方程 (3.27a) 定义
$E_{\infty}$	由方程 (3.23) 定义

- $E_i = E_i + (kT/2q)\ln(\sigma_h/\sigma_e)$  (§ 4.4.1)  
 $\mathcal{E}$  半导体中的电场强度  
 $\mathcal{E}_i$  界面层中的电场强度  
 $\mathcal{E}_{\max}$  肖特基势垒中的最大电场强度  
 $f$  陷阱被占据的几率  
 $F(x)$  Dawson 积分  $\left( = \exp(-x^2) \int_0^x \exp(y^2) dy \right)$   
 $h$  普朗克常数  
 $\hbar$  普朗克常数被  $2\pi$  除  
 $i = \sqrt{-1}$   
 $I$  电流  
 $J$  电流密度  
 $J_0$  反向饱和电流密度  
 $J_e$  电子电流密度  
 $J_h$  空穴电流密度  
 $J_{te}$  热发射电流密度  
 $J_r$  耗尽区中的复合电流密度  
 $J_g$  耗尽区中的产生电流密度  
 $k$  波尔兹曼常数  
 $k$  电子的波矢量 (§ 3.3.1)  
 $l$  电子的平均自由程  
 $L$  准中性区的厚度  
 $L_e$  电子的扩散长度  
 $m$  自由电子质量  
 $m^*$  半导体中电子的有效质量  
 $n$  半导体导带中的电子密度或理想因子(方程 3.14)  
 $n_i$  本征电子浓度  
 $N_c$  半导体导带中的有效态密度

$N_d$	施主密度
$N_t$	陷阱密度
$N_v$	半导体价带中的有效态密度
$p$	半导体价带中的空穴密度
$p_0$	耗尽区边缘处的平衡空穴密度
$q$	电子电荷
$Q_d$	单位面积上未被补偿的施主电荷
$Q_b$	单位面积的空穴电荷
$Q_m$	金属表面单位面积上的电荷
$Q_{ss}$	单位面积的表面态电荷
$r_0$	Thomas-Fermi 屏蔽距离
$S$	接触面积
$T$	绝对温度
$u$	$= q\phi/kT$ (附录 B)
$u_s$	表面 $u$ 的数值
$\bar{v}$	电子或空穴的平均热速度
$v_d$	扩散速度[方程 (3.18)]
$v_r$	复合速度 (§ 3.2.5)
$V$	所加的偏压(正向偏压为正)
$V_d$	扩散电压或“能带弯曲”
$V_{d0}$	零偏压下的扩散电压
$V_i$	界面上的电压降
$V_r$	反向偏压 ( $= -V$ )
$W$	耗尽区的宽度
$x_m$	势垒最大值的位置
$y$	图 4.10 中定义的长度 ( $= W - \lambda$ )
$\alpha$	$= \delta\epsilon_s/(\epsilon_s + q\delta D_s)$ [方程 (2.10)]
$\alpha'$	表示 $\phi_b$ 依赖于 $\mathcal{E}_{\max}$ 的经验值 (§ 3.6.1)

$\beta$	$= (\partial\varphi_c/\partial V)$ [方程(3.12)]
$\gamma$	$= \epsilon_i/(\epsilon_i + q\delta D_i)$ [方程(2.6)]
$\gamma_h$	空穴的注入比
$\delta$	界面层厚度
$\epsilon_i$	界面层介电常数 ( $= \epsilon_{ir}\epsilon_0$ )
$\epsilon_s$	半导体的介电常数 ( $= \epsilon_{sr}\epsilon_0$ )
$\epsilon'_s$	与镜像力有关的半导体有效介电常数
$\epsilon_0$	自由空间的介电常数
$\zeta_c$	电子的准费米能级
$\zeta_h$	空穴的准费米能级
$\theta$	负电性 (§ 2.9.2)
$\lambda$	图 4.10 中定义的长度
$\mu$	电子迁移率
$\nu$	光波频率
$\xi$	$= E_c - E'_F$
$\rho$	单位面积的表面偶极矩
$\sigma_c$	电子俘获截面
$\sigma_h$	空穴俘获截面
$\tau_{ec}$	电子两次碰撞间的平均时间
$\tau_{ch}$	空穴两次碰撞间的平均时间
$\tau_{rc}$	电子复合时间
$\tau_{rh}$	空穴复合时间
$\varphi_b$	肖特基势垒高度 (由 $E'_F$ 测量)
$\varphi_{b0}$	零偏压势垒高度
$\varphi_b^0$	零电场势垒高度 (平带势垒高度)
$\varphi_{bn}^0$	n 型半导体平带势垒高度
$\varphi_{bp}^0$	p 型半导体平带势垒高度
$\varphi_c$	有效势垒高度 ( $= \varphi_b - \Delta\varphi_{bi}$ )



- $\varphi_{e0}$  零偏压下有效势垒高度
- $\varphi_m$  金属功函数
- $\varphi'_m$  相对于  $\text{SiO}_2$  导带的金属功函数 (§ 2.7.1)
- $\varphi_0$  表面态的中性能级 (§ 2.1.3)
- $\Delta\varphi_{bi}$  镜像力引起的势垒降低
- $(\Delta\varphi_{bi})_0$  零偏压下镜像力的降低
- $\chi_s$  半导体的电子亲和力
- $\chi'_s$  相对于  $\text{SiO}_2$  导带的电子亲和力 (§ 2.7.1)
- $\psi$  静电势
- $\omega_b$  偏压调制的角频率
- $\omega_s$  测试信号的角频率

注意,全部采用 MKS 单位制.所有能量均用电子伏度量,因此一个电子静电势能的数值等于以伏特为单位的电位.

有时表面态密度以  $J^{-1}m^{-2}$  来度量.如果  $D_s$  以  $eV^{-1}m^{-2}$  来表示,  $D'_s$  以  $J^{-1}m^{-2}$  来表示,则  $D_s = qD'_s$ .

# 目 录

符号表	vii
第一章 引言和概论	1
1.1 历史	1
1.2 肖特基势垒	3
1.3 电流电压特性	5
1.4 与 p-n 结的比较	10
1.5 电容效应	12
1.6 实际的接触	13
1.7 欧姆接触	15
1.8 目前状况	16
1.9 参考书目	16
第二章 肖特基势垒	19
2.1 预备知识: 固体的一些表面性质	19
2.1.1 金属的功函数	19
2.1.2 半导体的功函数与电子亲和力	19
2.1.3 表面态	20
2.2 肖特基势垒的形成	21
2.2.1 肖特基-莫特理论	21
2.2.2 表面态的影响	26
2.3 势垒模型的一般分析	29
2.3.1 平带势垒高度	29
2.3.2 势垒高度对电场的依赖关系	33
2.3.3 P型半导体	34
2.3.4 势垒高度对偏压的依赖	36

2.3.5	电场穿透到金属中 .....	37
2.4	镜象力引起的势垒高度降低 .....	38
2.5	直接接触 .....	42
2.6	势垒高度的测量方法 .....	47
2.6.1	用 $J/V$ 特性测量 .....	47
2.6.2	用光电方法测量 .....	49
2.6.3	用电容方法测量 .....	49
2.7	腐蚀表面上势垒高度的测量 .....	51
2.7.1	硅 .....	51
2.7.2	锗 .....	61
2.7.3	III-V 族化合物 .....	62
2.7.4	其他半导体 .....	65
2.8	直接接触势垒高度的测量 .....	66
2.8.1	硅 .....	66
2.8.2	锗 .....	70
2.8.3	III-V 族化合物 .....	70
2.8.4	其他半导体 .....	71
2.9	讨论 .....	71
2.9.1	一般讨论 .....	71
2.9.2	解理表面 .....	72
2.9.3	腐蚀表面 .....	77
<b>第三章</b>	<b>电流输运机理</b> .....	<b>80</b>
3.1	导论 .....	80
3.2	越过势垒的发射 .....	81
3.2.1	两种基本机理 .....	81
3.2.2	扩散理论 .....	83
3.2.3	热发射理论 .....	86
3.2.4	镜象力对电流-电压特性的影响 .....	89
3.2.5	热发射-扩散理论的结合 .....	92
3.2.6	“热电子”效应 .....	94

3.2.7	热发射理论的修正 .....	96
3.2.8	与实验结果的比较 .....	98
3.3	穿越势垒的隧道效应 .....	100
3.3.1	场和热场发射 .....	100
3.3.2	欧姆接触 .....	107
3.4	耗尽区中的复合 .....	109
3.5	空穴注入 .....	112
3.5.1	平面接触中空穴注入 .....	112
3.5.2	点接触中空穴的注入 .....	114
3.6	反向特性 .....	115
3.6.1	势垒高度对电场的依赖关系 .....	115
3.6.2	隧道效应的作用 .....	117
3.6.3	耗尽区中电子空穴对的产生 .....	124
3.7	瞬态效应 .....	124
3.8	界面层的影响 .....	126
3.9	" $T_0$ "效应 .....	130
<b>第四章</b>	<b>肖特基势垒电容</b> .....	<b>132</b>
4.1	反向偏压下理想二极管的电容 .....	132
4.1.1	一般情况 .....	132
4.1.2	少数载流子可忽略的情况 .....	136
4.1.3	少数载流子的影响 .....	138
4.2	界面层的影响 .....	141
4.3	非均匀施主分布 .....	143
4.4	深陷阱的影响 .....	147
4.4.1	反向偏压下深陷阱的被占据数 .....	148
4.4.2	陷阱对电容的影响 .....	152
4.4.3	瞬态测量 .....	158
4.4.4	光照的影响 .....	162
4.5	正向偏压下的电容 .....	164

4.5.1	扩散电容 .....	164
4.5.2	陷阱的影响 .....	165
<b>第五章</b>	<b>实际接触</b> .....	<b>168</b>
5.1	制备方法 .....	168
5.1.1	点接触 .....	168
5.1.2	蒸发接触 .....	168
5.1.3	溅射接触 .....	170
5.1.4	化学沉积 .....	171
5.2	热处理的影响 .....	172
5.3	硅 .....	178
5.3.1	反应动力学 .....	179
5.3.2	势垒高度 .....	182
5.4	势垒高度的控制 .....	183
5.5	欧姆接触 .....	185
<b>附录 A</b>	<b>耗尽层近似</b> .....	<b>189</b>
<b>附录 B</b>	<b>肖特基势垒中电场的精确分析</b> .....	<b>192</b>
<b>附录 C</b>	<b>肖特基势垒与 p-n 结的比较</b> .....	<b>195</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>201</b>

# 第一章 引言和概论<sup>1)</sup>

## 1.1 历史

对金属半导体接触的认识，要追溯到一百多年前 Braun 的早期工作(1874 年)，他发现了金属与半导体接触(如铜和铁的硫化物)之间导电性能的不对称性。尽管当时对整流机制还不清楚，但金属触点和金属硫化物之间的接触在早期的无线电实验中已被广泛地用作检波器。看来 Lodge 的“金属屑检波器”(称为 coherer, 1890 年)的作用必然是利用了被氧化膜隔开的金属微粒的导电性质。1906 年 Pickard 得到了用硅作点接触二极管的专利，1907 年 Pierce 发表了论文，阐明了将金属喷涂到各种半导体上做成的二极管的整流特性。本世纪廿年代广播事业的高速发展，在很大程度上要归功于“触须”整流器，这种整流器通常用钨针尖触到铅的硫化物晶体上做成。第一个氧化铜平面整流器也差不多在同一时期问世 (Grondahl 1926, 1933 年)。

1931 年，在了解金属半导体接触整流作用方面迈出了第一步。当时 Schottky, Störmer 和 Waibel 指出，如果有电流流过，电势降落几乎完全发生在接触处，这就意味着在接触处存在着某种势垒。此时量子力学已经稳固地建立。1932 年，Wilson 和其它一些人试图根据电子通过势垒的量子力学隧道效应来解释整流作用，但很快就认识到用这种机制预期的

---

1) 本章为初次接触此领域的读者提供一个概括的说明。

电流易于通过的方向是错误的。1938年 Schottky 和 Mott 分别指出,如果电子经过正常的漂移和扩散过程越过势垒,那么就可以解释所观察到的整流方向。按照 Mott (1938年)的看法,势垒起因于金属和半导体功函数的不同;他假设势垒区中没有荷电杂质,因此电场是一常数。在逐渐接近金属时,静电势呈线性变化。与此不同, Schottky (1939年)假设势垒区含有恒定密度的荷电杂质,因此根据泊松方程,当接近金属时,电场线性地增加,静电势按平方规律增加。关于空间电荷在确定势垒形状中所起的作用,苏联的 Davydov (1939, 1941年)也曾提出过类似的看法。

在第二次世界大战期间,锗、硅点接触整流器在微波雷达上的应用,使我们对金属半导体接触的了解取得了重大的进展。半导体物理的发展对此也起了很大的促进作用。在此期间,最重要的贡献恐怕是 Bethe 的热发射理论(1942)。根据这一理论,电流取决于电子发射到金属内的过程,而不是象 Mott 和 Schottky 所假设的那样,由半导体中的漂移和扩散过程来决定。

第二次世界大战后,半导体物理领域的蓬勃发展,导致了点接触晶体三极管的诞生,从而推动了金属半导体接触方面的研究,这时注意力主要集中于作为少数载流子注入器的点接触。点接触晶体管的过时,使人们的注意力转向了面接触。人们认识到在高真空系统中蒸发金属薄膜产生的接触,无论在稳定性和重复性方面都比点接触好得多,于是激起了五十年代和六十年代研究的热潮,并为我们现在对这个课题的广泛知识奠定了基础。接触在半导体工艺上的重要性,在很大程度上促进了这一研究热潮的兴起,而且与 Bardeen, Crowell 和 Sze 的理论工作以及 Goodman, Archer 和 Atalla 及 Kahng, Mead 和 Cowley 的实验工作有着密切关系。

## 1.2 肖特基势垒

肖特基关于势垒的形状由离化杂质产生的均匀空间电荷决定的假设,通常与实际发生的情况符合得相当好.因此,金属半导体接触常常不加区别的统称为肖特基势垒,而有意制造的具有一定整流性能的接触则称为肖特基二极管.这种势垒具有抛物线形状, n型半导体的势垒如图 1.1 所示.在 n型半导体中,杂质通常在室温下是完全电离的浅施主.由于正空间电荷引起的能带向上弯曲,产生了类似于 p-n 结 n型一侧的导带电子被耗尽的区域.这一区域有各种名称: 势垒区、空间电荷区或耗尽区.在 P型半导体中,由于电离受主的负空间电荷的存在,能带向下弯曲.这种向下弯曲对空穴形成了一个势垒,因为空穴的行为有些象气泡,它们从势垒下面通过是困难的.

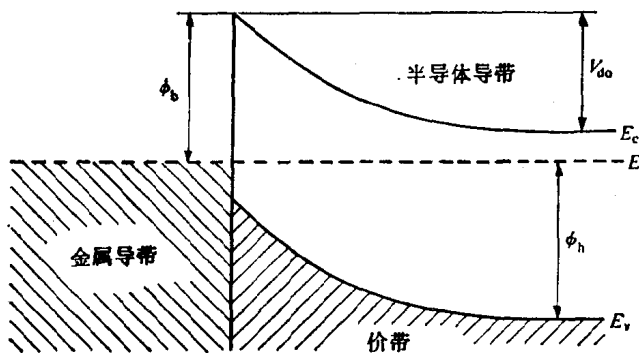


图 1.1 金属和 n 型半导体之间的肖特基势垒 (零偏压)

金属和半导体之间因为接触势 (功函数之差) 产生势垒. 根据 Mott (1938) 理论, “扩散势”或“能带的弯曲”  $V_{do}$  应该



等于功函数之差 ( $\varphi_m - \varphi_s$ ), 因而从金属一侧看过去的势垒高度  $\varphi_b$  应该由金属功函数  $\varphi_m$  和半导体电子亲和力  $\chi_s$  之差给出(见 § 2.2.1)。势垒高度测量表明,  $\varphi_b$  几乎与选用的金属无关。Bardeen (1947) 根据半导体存在表面态解释了这种现象。这些表面态有效地屏蔽了半导体内部, 使其不受金属的影响, 并且吸收了接触势差(见 § 2.2.2)。如果表面态密度非常高, 势垒高度应该不依赖于金属的功函数。但是, 在一般情况下,  $\varphi_b$  应该是  $\varphi_m$  的线性函数, 其斜率小于 1 (见 § 2.3.1)。

Bardeen 的模型假定, 在金属和半导体之间存在一个很薄的绝缘层。如果接触是在腐蚀的半导体表面上沉积一薄层金属做成, 那么 Bardeen 模型和实际情况是很接近的, 因为化学腐蚀不可避免地要在表面留下大约 10—20 Å 的氧化层。利用在某一种半导体腐蚀表面上沉积各种金属的方法所获得的势垒高度的实验数据表明, 势垒高度与金属的功函数的相关性很差。这一方面是因为势垒高度依赖于半导体表面制备方法的细节, 因而使得各组测量数据之间出现了较大的离散, 而另一方面是因为金属功函数数值的不够精确。可以肯定的只有一点, 即功函数高的金属倾向于形成高的势垒, 而功函数低的金属倾向于形成低的势垒 (§ 2.7)。

我们有能够做成没有任何界面绝缘层的接触, 办法是在超高真空中解理出半导体的一个新鲜表面, 然后在它还没有来得及被沾污之前迅速地用蒸发的方法淀积上一薄层金属。从理论上分析这种“直接的”接触比分析夹有界面层的接触更为困难, 因为后者使半导体和金属“退耦合”到这样一种程度, 即表面态受金属的影响不太大。然而, 对于直接接触, 表面态严重地受到金属的影响, 为此必须把金属和半导体结合起来看成一个量子力学系统。由于计算上难以解决, 因而目前理论的定量预测方面几乎没有什么进展。然而, 由于改善了测