

模拟与 数字电子技术基础 问与答

陈克镛 李忠波 编

机械工业出版社



模拟与数字电子技术基础

问 与 答

陈克镭 李忠波 编



机械工业出版社

本书是编者把近几年来教学过程中,同学提出的一些问题及教学实践中认为应该掌握的最基本内容、重点、难点积累起来,加以整理和补充,以问答的形式编写而成的。本书共十五章,前十章为模拟部分,包括半导体与二极管、晶体三极管、基本放大电路、场效应管及其放大电路、多级放大电路与频率响应、反馈与振荡电路、直接耦合放大电路与线性集成电路、运算放大器的应用、直流稳压电源、功率放大电路,共有问答题356道。后五章为数字部分,包括门电路、数字电路的逻辑分析、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形,共有问答题168道。

本书是以问答形式编写的,并且力求与通用教材保持一致性,便于读者结合教材进行学习时遇到疑难问题能及时得到解答。

本书主要供广播电视大学、职工大学、业余大学、普通高等学校的学生和自学者参考。

模拟与数字电子技术基础问与答

陈克诰 李忠波 编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 13 7/8·字数 368 千字

1987年3月北京第一版·1987年3月北京第一次印刷

印数 0,001—8,100·定价 4.00 元

统一书号: 15033·6547

前 言

本书是编者根据近几年来,在广播电视大学、职工大学、业余大学进行辅导,讲授等教学过程中同学所提出的一些问题,以及教学实践中认为应该掌握的最基本的内容和难点、重点而积累起来的问题加以整理和补充;并参阅几本主要通用教材(童诗白主编的《模拟电子技术基础》、阎石主编的《数字、电子技术基础》、康华光主编的《电子技术基础》),以问答的形式编写成这本书。

本书吸收了程序教学的优点,采取了问答的形式,即把有关模拟与数字技术基础的基本概念与基本方法,也包括一定数量的实际问题和常识性的问题,按照程序学习的教育方法,并遵循通用教材的系统,将学习内容展开。这样便于读者自学,当读者在结合教材学习中遇到疑难问题时能够有针对性地及时地得到解答。

全书共有十五章524个问答题,其中模拟部分356个问答题,数字部分168个问答题。

编写本书的主要目的是为了帮助广播电视大学、职工大学、业余大学、普通大学学生和自学的同志在学习过程中遇到疑难问题时起到有如家庭教师的辅导作用。

李忠波老师编写了本书的前十章模拟电路部分,陈克辑老师编写了本书的后五章数字电路部分,并负责统稿工作。

本书由陕西机械学院北京研究生部缪澄源老师主审,对初稿进行了认真地审阅,并提出了宝贵意见。

由于我们的水平有限,加之时间比较仓促,书中错误和不妥之处,在所难免,殷切地期望各方面的读者能够给予批评和指正。

编者 1985.6

目 录

第一章	半导体与二极管	1
第二章	晶体三极管	25
第三章	基本放大电路	53
第四章	场效应管及其放大电路	87
第五章	多级放大电路与频率响应	115
第六章	反馈与振荡电路	150
第七章	直接耦合放大电路与线性集成电路	193
第八章	集成运算放大器的应用	215
第九章	直流稳压电源	255
第十章	功率放大电路	296
第十一章	门电路	317
第十二章	数字电路的逻辑分析	351
第十三章	组合逻辑电路	367
第十四章	时序逻辑电路	386
第十五章	脉冲波形的产生和整形	413
主要参考文献		438

第一章 半导体与二极管

1-1 什么叫半导体？

答

半导体是导电能力介于导体与绝缘体之间的物体。一般导体的电阻率约为 $10^{-8} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ；绝缘体的电阻率约为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ ；而半导体的电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。更重要的是半导体的电阻率有如下特性：

(1) 在半导体中掺入一些杂质可改变其电阻率和导电类型(即可形成电子导电型——N型或空穴导电型——P型半导体)。例如在纯硅中掺入百万分之一的杂质(硼或磷)，其电阻率就从 $214000 \Omega \cdot \text{cm}$ 下降到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ ，导电能力提高50多万倍，利用半导体的这种掺杂性可以制成各种电子器件。

(2) 半导体的电阻率随温度变化很敏感，并随掺杂浓度不同，具有或正、或负的电阻温度系数。例如纯锗由 20°C 变到 30°C 时，其电阻率将下降一半左右，热敏电阻就是利用半导体的这种特性制成的。

(3) 光照(或核辐射、强磁场等)能改变半导体的电阻率。例如适当的光照可减小半导体的电阻率，利用半导体的这种光敏性可以制成光电管等半导体器件。

当然，半导体的热敏性和光敏性也有它不利的一面。

1-2 什么叫本征半导体？本征半导体中电子浓度与空穴浓度有什么关系？为什么在绝对零度时半导体表现为绝缘体？

答

本征半导体就是纯净的半导体，即无杂质，无位错，晶格完整和没有任何缺陷的半导体。

由于本征半导体中电子与空穴成对地产生，成对地复合，因此电子浓度与空穴浓度总是相等的。在绝对零度(0K)时，半导

体晶体中的所有共价键电子无从获得激发能,因而填满价带。这样在半导体中就没有导电粒子存在,半导体就表现为绝缘体了。

1-3 什么是空穴?空穴能否自由移动?画出示意图说明空穴是如何导电的。

答

在半导体晶体中,某个价键电子摆脱原子核的束缚而被激发后,在价键中留下一个空的位置,这个空位就叫空穴。空穴表现为带一个单位的正电荷($+q$)。

空穴在共价键中的移动是自由的。在半导体晶体中,原子间的外层轨道是重叠的,每个价电子就可认为是组成晶体的所有原子所共有的,因此每个价电子只需要很微弱的能量就可在整个晶体的价键内自由移动,这就是所谓价键电子的“共有化”运动。如果共价键中有空位,依靠空位的吸引力和原子的热振动,相邻共价键电子将很容易填补这个空位,所以价键电子向空位置的移动是十分自由的。然而,空穴的移动恰好是价键电子的运动在相反方向上的效果。那么,空穴在共价键中的移动也是十分自由的。

无外加电场时,空穴将在晶体中作无规则地运动;在电场 E

作用下,价键电子逆着电场方向运动,其结果相当于空穴顺着电场方向作定向运动,因而形成空穴电流。如图1-1所示,当电子沿虚线箭头方向移动时,空穴就沿实

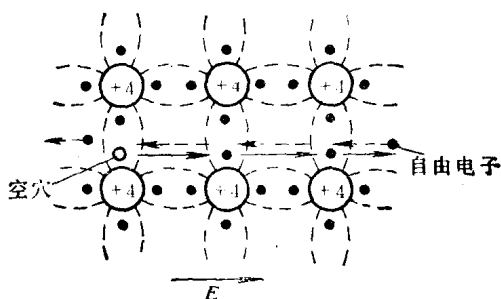


图1-1 半导体中的空穴流

线箭头向相反的方向移动。空穴导电的实质是大量共价键电子在相反方向运动的结果,但是为了讨论问题方便,常常把空穴看成是带 $+q$ 电荷的载流子。

1-4 半导体的电阻温度系数是正还是负？金属的电阻温度系数是正还是负？

答

半导体的电阻温度系数一般情况下是负的。即温度升高时，由于热激发作用，半导体晶体中将产生新的电子空穴对，使载流子的浓度增加，电阻率下降；反之，温度降低时，半导体的电阻率增加。因此，半导体的电阻温度系数是负的。

然而，重掺杂半导体能呈现正的电阻温度系数，即电阻值随温度增加而增加。这是因为在重掺杂半导体中，载流子的热激发成了次要矛盾，而载流子迁移率（指载流子在单位电场作用下的平均漂移速度）随温度升高而降低成为主要矛盾的缘故。

金属的电阻温度系数是正的。这是因为温度升高时，金属中的导电粒子不会象半导体那样增加，而金属原子的热振动作用增强，使自由电子定向运动所受的阻力增强，因此，金属具有随温度升高而增加的正的电阻温度系数。

1-5 什么是N型半导体和P型半导体？画出施主、受主杂质的硅晶体结构平面图。

答

在本征半导体中，可以用扩散的方法掺入其它元素的少量原子。这些原子对半导体基体而言，叫做杂质，掺有杂质的半导体叫杂质半导体。杂质半导体一般可分为两类：N型半导体和P型半导体。

N型半导体是在纯净的硅或锗半导体中掺入少量的五价元素（如磷、砷、锑等）得到的。若掺入的是磷（P），如图1-2a所示，则磷原子将在晶体中替代硅原子的位置，其中将有四个价电子与硅的价电子（只有四个）形成共价键。多余的一个价电子在共价键之外，只要有很小的激发能它就可以成为自由电子，而磷原子被电离为带正电的磷离子。由于这种半导体中的载流子主要是自由电子，因此称之为N型半导体，或电子型半导体。能够提供自由电子的杂质，称为施主杂质。

P型半导体是在纯净的硅或锗半导体中掺入少量的三价元素

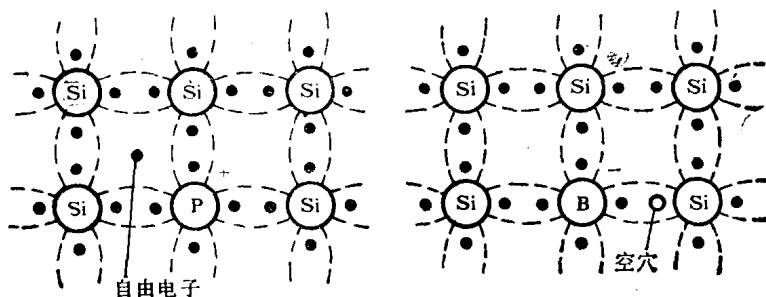


图1-2 硅晶体结构图 b)

a) 施主杂质(P) b) 受主杂质(B)

(如硼、铝、镓等)得到的。若掺入的是硼(B),如图1-2 b)所示,硼原子与硅原子构成共价键时,将因缺少电子而出现空位,这些空位很容易吸引附近的共价键电子来填充,形成能够参与导电的空穴,而硼原子被电离为带负电的硼离子。由于这种半导体中的载流子主要是空穴,因此称之为P型半导体,或空穴型半导体。能够提供空穴的杂质,称为受主杂质。

图1-2示出了施主杂质和受主杂质的硅晶体结构平面图。

1-6 本征半导体与杂质半导体有何不同?

答

本征半导体是指晶格完整,无任何缺陷和杂质的纯净半导体。本征半导体中的载流子一般是由热激发而产生的电子空穴对。因此本征半导体的特点是载流子的浓度紧紧依赖于一定的温度,并且电子和空穴的浓度总是相等的。而杂质半导体中的载流子主要是由掺杂质获得的,另外有一小部分是由本征激发产生的。杂质半导体的特点是其载流子浓度可以人为地进行控制。N型半导体中电子的浓度远大于空穴的浓度,P型半导体中空穴的浓度远大于电子的浓度,并且在一定的温度范围内,载流子的浓度主要取决于施主原子或受主原子的数量,而与温度的关系不大。

1-7 N型半导体中电子多于空穴、P型半导体中空穴多于电子,是否N型半导体带负电?P型半导体带正电?

答

N型半导体中的自由电子虽多，但与之对应的带正电的施主离子也多，并且自由电子数等于正离子数与空穴数之和；P型半导体中的空穴虽多，但与之对应的带负电的受主离子也多，并且空穴数等于负离子数与自由电子数之和。这就是说在半导体中正负电荷的总数是相等的，从宏观上看，它们的作用互相抵消，因此N型半导体和P型半导体都不带电，都是电中性的。

1-8 什么是载流子的产生与复合？什么是载流子的平均寿命？

答

价电子获得额外的能量(激发能)从价带跃迁到导带而产生载流子的过程叫载流子的产生。载流子的产生有三种形式：

(1) 本征激发 是指价键电子获得额外能量由价带跃迁到导带，同时产生电子空穴对的过程。

(2) 施主电离 这种载流子的产生方式是指施主杂质未进入共价键的电子获得少量激发能变为自由电子的过程。施主电离只产生自由电子，而施主原子本身变为正离子。正离子不能移动，不能参与导电。

(3) 受主电离 是指受主原子获得电子，同时产生空穴的过程。受主电离只产生空穴，而受主原子被电离为负离子。负离子也不能参与导电。

复合是指自由电子与空穴相遇，重新填入共价键中空位的过程。复合使自由电子和空穴成对地消失。复合与载流子的产生是半导体中的一对矛盾，在一定的温度下，二者处于一定的动态平衡中。

在半导体中，载流子(自由电子与空穴)的产生与复合是在不停地进行着，在单位体积内载流子从产生到复合所存在的平均时间称为载流子的平均寿命。这个参数在半导体器件中很重要，特别是非平衡载流子(由于外界条件变化而产生的载流子)的平均寿命，它表明已产生变化的电子和空穴的浓度回到其平衡条

件的浓度所需的时间。

1-9 什么是霍尔效应？根据霍尔效应实验可决定半导体的什么性质？

答

如果把一个通电流 I 的样品（金属或半导体）放在如图1-3所示的横向磁场 B 内，则在样品中产生既垂直于 I ，又垂直于 B 的电场 E ，这个现象通称为霍尔效应。可用来决定半导体的导电类型，并求出载流子的浓度。此外，还可以测出电导率并计算出迁移率等。

下面说明利用霍尔效应是怎样确定半导体的导电类型的。在图1-3中，如果 I 指向正 x 方向， B 指向正 z 方向，那么，电流载流子就会受到一个负 y 方向的力。电流 I 可能是由半导体中的空穴从左向右移动所致，也可能是由自由电子从右向左移动所致。因此，无论空穴载流子还是电子载流子都会受

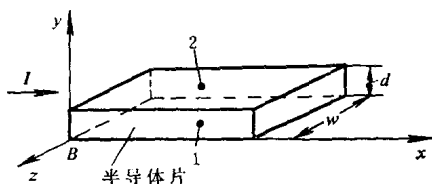


图1-3 半导体中的霍尔效应

洛伦兹力的作用被迫积累到图1-3中的1边（因为空穴和电子的运动方向相反，并且电荷符号也相反，所以磁场对二者的偏转作用方向相同）。如果半导体是N型材料因而载流子是电子的话，这些电子就会堆积在1边，从而使这个表面相对于2边来说，变成带负电。因此，在1和2两个表面之间出现一个电位差，这个电位差叫霍尔电压。霍尔电压形成的电场力与洛伦兹力相平衡，因而使大部分载流子继续象原先一样流动。

如果霍尔电压的极性在2端为正，则如上所述，载流子必为电子，半导体是N型的。反之，如果1边相对于2边带正电，则半导体必为P型。

如果 I 是P型半导体内的电流，可以认为载流子是从右跳到左的束缚电子。那么，1边将带负电。但是实验表明，P型半导

体的1边相对于2边的电位为正。这就进一步证实空穴的作用与传统的自由正电荷载流子的作用是一样的。

1-10 扩散电流与漂移电流的区别是什么？

答

扩散电流是由于载流子浓度不均匀产生扩散运动而形成的电流。在半导体中，有电子扩散电流和空穴扩散电流。

漂移电流是载流子在电场作用下定向运动形成的电流。在本征半导体中，它等于电子漂移电流与空穴漂移电流之和；在N型半导体中，它近似等于电子漂移电流；在P型半导体中，它近似等于空穴漂移电流。

可见，扩散电流与漂移电流的主要区别是它们的形成原因不同。

1-11 试说明PN结形成的物理过程。

答

P型半导体的多数载流子是空穴，少数载流子是电子；N型半导体的多数载流子是电子，少数载流子是空穴。当P型半导体和N型半导体通过一定的工艺过程结合在一起时，由于二者的载流子浓度分布不均匀，必然会使P区的空穴向N区扩散，而N区的电子向P区扩散，如图1-4a)所示。

当P区交界面附近的空穴扩散到N区（它最终与N区的多数载流子电子复合），就会在P区留下一些不能移动的负离子；于是在两种半导体交界面的附近就形成了一个很薄（约为数十微米）的正、负离子层，称为偶电层或空间电荷区（亦称耗尽层、阻挡层、位垒区等），它就是PN结，如图1-4b)所示。

这种扩散现象是否会不断地进行下去，直至两个半导体的载流子浓度完全一样才停止呢？不会的。这是因为这种扩散不是普通粒子的扩散，而是带电粒子的扩散。

PN结靠P区的一边带负电，靠N区的一边带正电，这就在交界面处产生一个接触电位差（位垒） U_{bo} ，并形成一個方向由N区指向P区的内电场。由于内电场的建立，它将阻碍PN结两

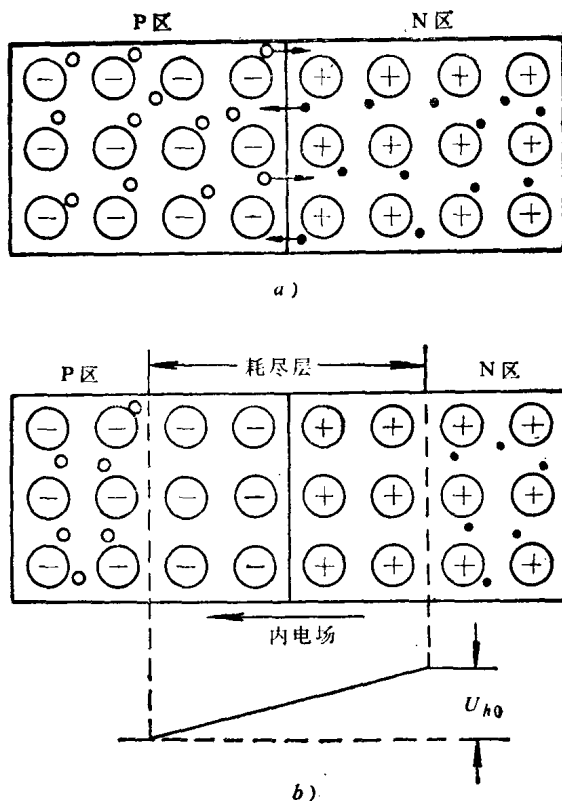


图1-4 PN结的形成

a) 电子和空穴的扩散 b) 平衡状态下的PN结

侧多数载流子的扩散运动，而有利于PN结两侧少数载流子的漂移运动。载流子的扩散运动与漂移运动方向相反，扩散电流与漂移电流的方向也相反，从而构成PN结中载流子运动的一对矛盾。

在扩散开始时，矛盾的一方——扩散运动占优势，因此，扩散顺利地进行。随着扩散的进行，交界面处显露的正负离子逐渐增多，内电场逐渐增强，矛盾的另一方面——漂移运动也越来越强。最后，扩散力等于内电场力，扩散电流等于漂移电流，并相互抵消，载流子的扩散运动与漂移运动达到动态平衡。就这样，形成了一个平衡状态下的PN结。可见，在无外加电场或其它激

发因素作用时，PN结没有电流通过。

1-12 PN结在反向偏置下，耗尽层宽度是增加还是减小？位垒有何变化？正向偏置下又如何？

答

PN结外加反向电压 U 时，作用在PN结上的外电场与内电场方向相同，因此空间电荷量增加，耗尽层的宽度也增加，位垒也由原来的 U_{A0} 增加至 $U_{A0} + U$ 。如图1-5所示。

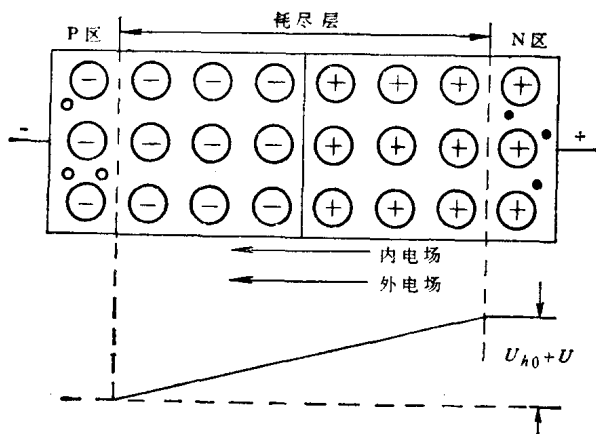


图1-5 外加反向电压的PN结

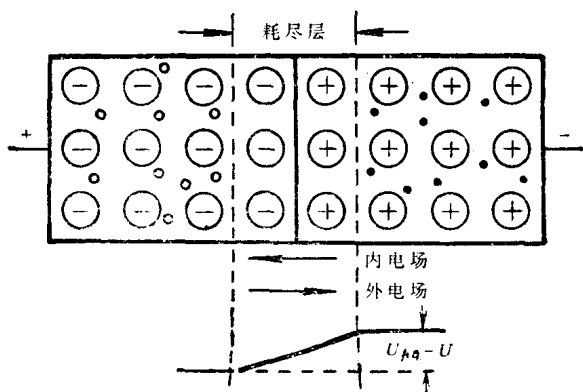


图1-6 外加正向电压的PN结

若PN结外加正向电压 U 时,则作用在PN结上的外电场与内电场方向相反,因此空间电荷量减少,耗尽层的宽度也将减小,位垒也由原来的 U_{A0} 减小为 $U_{A0}-U$ 。如图1-6所示。

1-13 PN结中的空间电荷是由什么构成的:是电子、空穴、中性施主、中性受主、还是离子化施主和离子化受主?

答

PN结中的空间电荷是由离子化施主(N区一侧)和离子化受主(P区一侧)构成的。

1-14 PN结的能带为什么是弯曲的?

答

从能带的角度来看,在PN结内,N型半导体相对于P型半导体既然存在着电位差 U_{A0} (即所谓接触电位差),则在考虑PN结的能带时,应该将这一电位差所引起的附加的电子静电位能($-qU_{A0}$)考虑进去。这样N区导带电子的能量要比P区导带电子的能量低 qU_{A0} ,也就是说,N型半导体的能带相对于P型半导体的能带将相应地降低一个量值 qU_{A0} 。例如,两种半导体的能带如图1-7a)所示,形成PN结后,能带将呈弯曲形状,如图1-7b)所示。这时N区导带电子和P区价带空穴虽然很多,但由于位垒的阻挡,它们不能往对方扩散。

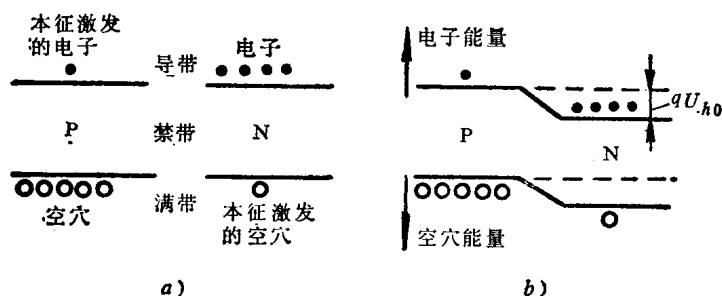


图1-7 P-N型半导体接触前后的能带情况

a) 接触前 b) 接触后

1-15 短路与开路PN结为何有相同的电气特性?

答

所谓短路PN结就是将PN结用一根金属导线短路，开路PN结就是将PN结开路，在这两种情况下，PN结同样处在一种热平衡状态下，是不可能产生电流的，位垒 U_{A0} 仍保持不变。如果认为PN结短路时有电流流通，那么金属导线就会发热。由于没有外部电源可用，加热金属导线所需的能量就必须由PN结片供给。因此，半导体结片就应变冷。显然，在热平衡状态下，不可能同时既使金属导线发热，又使结片变冷，于是可以断定电流为零，与开路情况相同。

在短路情况下，环绕闭合回路的电压之和一定为零，那么PN结的静电电位 U_{A0} 作用到哪里去了呢？一种说法是结电位 U_{A0} 完全被欧姆接触处的金属——半导体接触电位所补偿。另一种解释是 U_{A0} 所形成的电场力与PN结两侧载流子的扩散力相平衡，因此 U_{A0} 是没有能力驱动载流子形成电流的。当我们把导线切开时，测量切口处的电压降一定为零。也就是说，我们不可能用电压表直接测量接触电位差 U_{A0} 。PN结的这种电气特性是符合能量守恒定律的，要想使PN结有电流流通，就得以某种方式不断地对它提供能量才行（例如加偏置电压、光照等）。

1-16 PN结加正向小电压时为何电流很小？加正向大电压时电流又为何直线上升？

答

当外加正向电压远小于PN结的接触电位差 U_{A0} 时，外电场还不能明显地削弱内电场对多数载流子扩散运动造成的阻力，这时正向电流的主要成份是势垒区的复合电流，而不是通过PN结的扩散电流，因此加正向小电压时电流很小。

增加外加电压，在曲线正向特性起始上升部分，电流按指数规律增加，如题1-18中二极管的伏安方程所表示的那样。若继续增加外加电压使其接近 U_{A0} ，这样内电场将大部分被抵消，结电阻大大减小，以致使P区和N区的体电阻以及电极的欧姆接触电阻超过结电阻，从而使电流与电压的关系服从欧姆定律，所以

PN结的正向特性直线上升。

1-17 什么叫欧姆接触？

答

欧姆接触一般是指半导体器件的金属引出线与半导体材料(N型或P型半导体)之间的一种连接方式。为了使电极引线的制作不影响半导体器件的性能,必须使金属电极与半导体的接触是低电阻值的,接触电位应是常值,与电流的方向和大小无关。金属与半导体之间这种无整流作用的低阻值的接触就叫欧姆接触。

1-18 写出二极管的伏安方程,并解释各个符号的含义。

答

二极管的伏安方程是

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1) = I_s(e^{qU/kT} - 1)$$

式中 I 为流过二极管的电流;

U 为施于二极管两端的电压;

I_s 为二极管的反向饱和电流;

$U_T = \frac{kT}{q}$ 称为温度的电压当量,在常温(300 K)

时, $U_T \approx 26\text{mV}$;

k 为波尔兹曼常数, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

q 为电子电量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

T 为绝对温度。

1-19 用同一坐标大致画出锗二极管和硅二极管的伏安特性曲线,并说明二者的主要差别。

答

锗二极管和硅二极管的伏安特性曲线如图1-8所示。由图可见硅管正向特性部分的死区电压比锗管的大,硅管约0.7V,锗管约0.3V。在曲线的反向部分,硅管的反向漏电流为nA级,锗管的反向漏电流为μA级;硅管的反向击穿电压 U_B 一般也比锗管的高。

1-20 什么是二极管的对数伏安特性？