

高等学校教学用书

晶体管原理

北京大学物理系
半导体物理教研室編著

人民教育出版社

高等学校·教学用书·



晶 体 管 原 理

北京大学物理系
半导体物理教研室編著

人 民 教 育 出 版 社

本书是由北京大学物理系半导体物理专门化56级全体同学与教师编写的。书中较全面地介绍了有关晶体管基本原理的知识,也介绍了若干重要的工艺和设计原则。

本书可作为高等学校半导体物理专门化课程的教材,也可供从事晶体管的生产、试制和设计的工作者参考。

簡 裝 本 說 明

目前 850×1168 公厘規格紙張較少,本書暫以 787×1092 公厘規格紙張印刷,定價相應減少20%。希鑒諒。

晶体管原理

北京大學物理系
半導體物理教研室編著

人民教育出版社出版 高等学校教学用书编辑
北京宣武門內承恩寺7号

北京市书刊出版业营业许可出字第2号

工人日报印书厂印装 新华书店发行

统一书号13010·829 开本 787×1092 1/32 印张7 12/16 插页1

字数79,000

印数0001—23,000

定价(6) 0.65

1960年9月第1版 1960年9月北京第1次印刷

目 录

緒論	1
第一章 $p-n$ 結	7
§ 1. $p-n$ 結的获得	7
§ 2. $p-n$ 結的整流作用	28
§ 3. 击穿現象	38
§ 4. 最大整流电流和功率消耗	48
参考文献	54
第二章 晶体二极管	57
§ 1. 点接触型二极管的伏-安特性曲线	58
§ 2. 用作高频开关元件的二极管	60
§ 3. 用于高频电路的二极管	67
§ 4. 制造点接触二极管一些問題的考虑	71
参考文献	72
第三章 晶体三极管的基本工作原理	73
§ 1. 晶体三极管中的电流傳輸机构	75
§ 2. 伏安特性和电流放大系数	78
§ 3. 晶体三极管的小信号参数和等效电路	88
§ 4. 晶体三极管的放大作用	99
§ 5. 晶体三极管的设计	103
参考文献	109
第四章 功率管	110
§ 1. 大电流工作情況下的三极管	110
§ 2. 收集极电压的限制	121
§ 3. 温度影响和散热問題	125
§ 4. 功率管的设计	128
参考文献	132
第五章 高频晶体管	133
§ 1. 高频时电流放大系数 α 的下降現象	133

§ 2. 晶体三极管的高频优质	147
§ 3. 几种高频晶体管	154
参考文献	162
第六章 开关晶体管	164
§ 1. 开关三极管	165
§ 2. <i>pnp</i> 管(開流管)	176
参考文献	182
第七章 晶体管的稳定性与噪声问题	184
§ 1. 表面状态对晶体管稳定性能的影响	185
§ 2. 气氛对晶体管的影响	187
§ 3. 目前解决晶体管稳定性的一般途径	191
§ 4. 晶体管噪声	193
参考文献	201
第八章 其他类型晶体管	203
§ 1. 场效应晶体管	203
§ 2. 参量放大器	207
§ 3. 雪崩晶体管	211
§ 4. 化合物半导体晶体管	222
§ 5. 隧道二极管	223
参考文献	229
附录	231

緒 論

在这偉大的二十世紀六十年代，我国六亿五千万人民正在高速度地发展我国的社会主义建設，要在不长的時間内，把我国建成一个具有高度发展的現代工业、現代农业和現代科学文化的偉大的社会主义国家。而近十多年发展起来的半导体晶体管，在現代工业、現代农业和現代国防事业上越来越占有重要的地位，因此我們半导体工作者必須在最短時間内，攻下这个科学堡垒，攀上世界科学的頂峰。

(一)

晶体管是一种固体电子器件。早在 1895 年 5 月 7 日，无綫电創造人波波夫所作的、人类第一次无綫电訊号收发表演中所使用的檢波器，實質上就是利用了金属与自然晶体接触的檢波作用。这种晶体檢波器，在第一次世界大战前，曾被广泛的使用于軍事及其他部門的通訊設備中。第一次世界大战中出現的真空管，由于稳定和可靠，获得了迅速的发展，甚至有些专家认为晶体檢波的时代已經过去。事实上由于晶体檢波器制造簡單，不需要电源，在广大群众当中仍广泛采用，一些无綫电工作者也在不断进行研究和改进。在这个过程中，1922 年苏联学者洛謝夫，发现了晶体檢波器的負阻現象，制成了振蕩器和再生式收音机，这更激起了人們的注意，并开始研究发生在晶体接触面間的檢波过程。但是由于沒有工业生产，所以沒有引起人們的特別注意。直到 1926 年—1930 年前后，用氧化亚銅制出了工业上应用的整流器，并且投入生产以后，才大大促进了人們对半导体的研究工作。特別应当指出的是

晶体檢波器用于高频的优异特性，远远超过了真空二极管。二次大战中发展起来的雷达技术，对高频檢波器的要求，推动了人們对晶体檢波器的研究越来越广泛，越来越深入。各国先后建立了許多实验室，大規模地开展研究工作。这当中不仅反映了科学发展对生产实践的依賴关系，也反映了实践認識再实践再認識的对事物的認識过程。但总的說来，这一时期人們对半导体的認識仅仅是初級阶段。

人們为了进一步利用这些現象，并深入掌握其本质，使它服务于生产实践。第二次世界大战后，开始研究发生于晶体檢波器内部的物理过程，設計和制造新的檢波器。結果发现将特殊处理的鍺、硅作为檢波器可获得良好的結果。作出的鍺、硅微波二极管具有优良的性能。当时由于工艺水平的限制，只有鍺二极管发展較为迅速，并部分的代替了小功率的真空二极管。鍺、硅二极管的广泛应用也促进了鍺、硅提純工作与晶体管理論的研究。1947年提出的 $p-n$ 結理論，使人們对于晶体二极管檢波作用的認識深入了一步。1948年发现了原始的点接触三极管有放大作用，使人們第一次看到制造体积小、重量輕的电子放大器件的可能性。由于长期生产实践与实验室研究积累了丰富的資料，再加上科学水平的高度发展，放大作用的发现虽然是偶然的，但它的出現却是在技术发展的推动下，科学发展的必然結果。由于进一步的研究，提出了 $p-n-p$ 与 $n-p-n$ 具有放大作用的理論，在这一理論指导下，不久人們就制得了面結型的晶体三极管。这样对半导体的認識也就更深入了一步。

生产技术水平的不断提高，推动了晶体管的进一步发展。特别是在1950年前后用切克劳斯基炉拉出了鍺单晶，不久后又拉出了硅单晶，并在1951年前后发展了鍺的区域提純和硅的无坩堝区域提純，成功地制得了純度高达八个“9”（即电阻率为几十欧姆·厘

米)的鍺、硅的单晶,滿足了生产晶体管所需要的原材料。就在这样的基础上,在1951年人們第一次用合金法試制成了面結型晶体管。虽然最初它的穩定性較差,噪声指数較大,而功率又小,頻率又低,使它的应用受到了限制,但是由于它具有重量輕,体积小、耗电少,能在低电压下工作,机械性能好等等根本性的优点,使它的发现为无綫电电子学的发展开辟了一条新的途徑。当时許多无綫电工作者圍繞着生产提出的高频和大功率的要求,开展了一系列研究工作。先后在1952年提出了場效应晶体管,1953年提出了面垒型晶体管,1954年提出了n-p-i-n型和p-n-i-p型晶体管等等。特别是在1955年,比較好的解决了穩定性問題以后,晶体管的生产得到了很快的发展。1955年左右利用扩散技术制造晶体管成功,对晶体管发展起了很大的推动作用,由于扩散深度可以很精确地控制,使得晶体管的截止頻率提高到几百以至几千兆周,初步解决了高频的問題。利用扩散技术首先在1956年制出了扩散型晶体管,紧接着在1958年先后提出了微合金扩散型晶体管,台面型晶体管等等。这就使得晶体管在更加广泛的范围內代替了真空管的地位。由于宇宙航行、导彈、計算技术的发展,迫切地需要大量的微波和毫微秒器件,于是在1957年就有人提出了可以利用p-n結电容随电压的非綫性变化制成参量放大器,頻率可以达到十万兆周,1958年又提出了开关速度达到2毫微秒的隧道二极管,目前各个国家都圍繞着寻求新的微波功率器件、微波寬頻带器件和超小型的器件,开展着大規模的研究工作。在这突飞猛进的发展过程中,許多不同类型的晶体管由于它們不能滿足生产实际的需要,或是不适宜于投入大量的生产,而逐渐被淘汰,例如某些生长結晶体管就是如此。在这里充分体现了科学对于生产的依賴关系。任何有意义的科学研究活动,必須来自实践而又为生产实践服务。

在晶体管迅速发展的同时，在半导体物理与其他科学的边缘上，又开拓了许多新领域。如：表面物理、半导体材料冶金、电化学的新发展等等。

综上所述，晶体管发展的历史是生产推动科学和科学服务于生产的历史。它雄辩地证明了辩证唯物主义认识论这一马列主义真理。诚如毛主席所谈：“实践、认识、再实践、再认识，这种形式，循环往复以至无穷，而实践和认识之每一循环的内容，都比较地进到了高一级的程度”^①。作为无产阶级知识分子，我们应该自觉地掌握和运用这个客观真理，使得我国的科学技术得以飞速的发展。

(二)

目前，我国正掀起了一个以机械化、半机械化、自动化、半自动化为中心的技术革新和技术革命运动，这个运动必将迅速地把生产推向一个新的更高的水平。这就需要相当数量的电子计算机、自动控制设备等。在这里，晶体管比起电子管具有许多的优点，总括起来有以下几方面：

(1)体积小、重量轻。

(2)寿命长。电子管使用时间一般为1千小时，而晶体管可达十万小时。

(3)功率消耗小、工作电压低。

(4)机械性能好。它一般采用金属或塑料外壳封装，不像真空管的玻璃外壳容易碎裂。

(5)不需要预热。

由于晶体管有上述的优点，它广泛的应用在以下几个方面：

(1)电子计算机。全部采用晶体管的电子计算机无论从体积

① 毛泽东选集，第一卷，第285页，1952年，人民出版社。

上、重量上、耗电上都大大减小,而且性能稳定,使用寿命长。目前已在許多国家广泛使用。

(2)自动控制。苏联已将晶体管应用于遙控采煤、开矿、炼鋼、及冶金和自动控制車床等方面。

(3)火箭导航和通訊設備。苏联火箭用的晶体管自动无綫电收发訊机的体积只有一个茶杯那么大,重量只有几百克。可以断言,未来的星际航行中,电子管最終必然全部为晶体管所代替。

(4)无綫电广播事业。它大量的被用在携带式收音机,助听器,电视接收机中。特别是在軍事通訊設備中,晶体管的应用更显示了它的优越性。

(5)有綫通訊中的載波机及自动电话交换机,长途电报脉冲譯碼系統中,也愈来愈多地应用了晶体管。

目前晶体管的生产和应用都还存在一定的問題和不足之處,在高頻大功率方面的特性,虽然一、二年来有着极大的发展,但是仍旧不如电子管;晶体管的噪音也还比較大;晶体管的特性受温度的影响(可通过电路設計来解决)和晶体管規格的不够統一,都給应用带来了不少麻煩。为了使晶体管能更加广泛地应用于国民經济的各个部門,我們不但要克服以上的缺点,还要向微波、高速开关及超小型方面发展,另外,象新材料的探求,新物理现象的应用也都需要开展广泛的研究工作。可以預料,在六十年代里,晶体管将会在人类征服自然、征服宇宙的斗争中發揮更大的作用。

(三)

我国晶体管工作和其他科学技术一样,在党的关怀和領導之下,半导体是一門年輕的科学,随着它的迅速发展,就愈来愈表现出它在国民經济各部門中的巨大作用。我們更清楚地知道,国际上仍然存在着帝国主义,他們极力扩軍备战,到处建立導彈基地,

矛头直接指向社会主义陣营, 指向苏联和中国, 严重威胁着世界和平。我們肩負着时代交給我們的光荣而艰巨的任务。我們要高举毛澤东思想的紅旗, 立大志, 下決心, 鼓干劲、攀高峰, 要為祖國的半导体事业的不断跃进冲锋陷陣, 把党的紅旗插到這門科学的頂峰。

第一章 $p-n$ 結

§ 1. $p-n$ 結的获得

在半导体器件中, $p-n$ 結占有重要的地位。无论二极管、光电元件或是三极管, 其基本结构都是 $p-n$ 結。在本节中, 我們將討論获得 $p-n$ 結的方法, 特別着重于在生产中广泛使用的合金法和扩散法。对于其他方法亦作一般介紹。

获得 $p-n$ 結的方法有很多。按其制法不同可分为下列三类: (1) 生长法; (2) 合金法; (3) 扩散法。由于生长法的工艺复杂、控制困难等缺点, 在現在一般的三极管生产中已很少应用。而合金法因为工艺简单, 成本低廉, 而且宜于大规模生产, 因此現在合金法晶体管是大量生产的晶体管类型之一。扩散法由于容易控制結的厚度及获得大面积 $p-n$ 結等优点, 在晶体管光电元件生产中, 特别是高频晶体管的生产中, 已經占有极为重要的地位。因此合金法和扩散法是目目前生产中制取 $p-n$ 結的两个最基本、最重要的方法, 我們將詳細的予以討論。对于生长法我們只准备作一簡略的介紹。

生长法就是在拉制单晶的过程中形成 $p-n$ 結的方法, 这样形成的結称为生长結。

图 1.1 是拉制单晶的示意图^[1] (以鍺为例)。底下是一个匀速轉动的坩堝, 內盛熔融状的鍺。坩堝上面是一根匀速轉动的金属杆, 在杆的末端固定一小段籽晶, 控制籽晶与液面正好接触。控制液面的温度, 使它略高于鍺的結晶温度, 这样在籽晶与液面接触处就

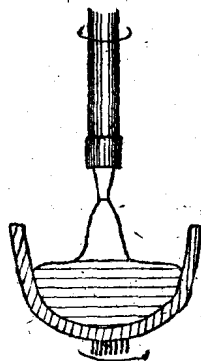


图 1.1

会在籽晶上生长出鍺的单晶来。金属杆又以均匀速率往上拉,因此随着杆的上升,在籽晶上就不断生长出柱状鍺的单晶。粗略地讲,杆的上升速率就可认为是单晶的生长速率 f 。生长速率大约是每小时几个厘米。

获得生长結的方法通常有多重掺杂法和改变生长速率法^[2]。

多重掺杂法就是在拉制单晶的过程中,在不同时刻分别把受主杂质或施主杂质掺入熔融的鍺中。这些杂质原子会与鍺一起凝結出来,使得鍺单晶在不同时刻就包含不同的杂质,从而形成 $p-n$ 結。

改变生长速率法是利用在鍺凝結为固相时,不同杂质的浓度随生长速率不同而改变的性质。在拉单晶过程中,把受主杂质和施主杂质同时掺入熔化的鍺中,控制一定的生长速率,使在某个生长速率 f_1 下,凝結出来的鍺中受主杂质浓度大于施主杂质浓度,形成 p 型鍺;在另一个生长速率 f_2 下,凝結出来的鍺中施主杂质浓度大于受主杂质浓度,形成 n 型鍺,从而形成 $p-n$ 結。

随着晶体管生产的发展,迫切需要一种工艺简单、价格低廉的

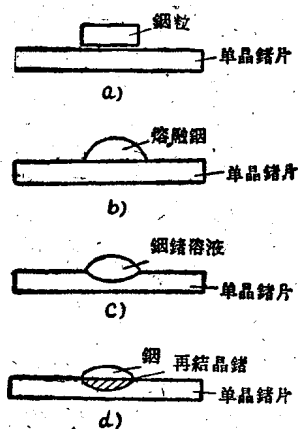


图 1.2 熔結过程示意图。

获得 $p-n$ 結的方法。因而使人們想到利用Ⅲ、Ⅴ族元素和鍺、硅的熔結过程来制造 $p-n$ 結,这种方法称为合金法。因这种方法获得的 $p-n$ 結称为合金結^[3]。

現在我們以錫、鍺的合金过程为例,简单地讲述一下用一般合金法制造 $p-n$ 結的过程。

将錫粒置于 n 型鍺片上,如图 1.2, a 所示。放在炉中加热,在 156°C 左右錫开始熔化,如图 1.2, b 所示。然

后繼續加热到 $500-600^{\circ}\text{C}$ 。銅熔化以后鍺原子就开始向銅中溶解,首先在界面处鍺的濃度变大,使得在熔融的銅中产生一个鍺的濃度梯度,从而引起鍺原子向内部的扩散。鍺不断溶解,不断向銅溶液内扩散,直至饱和而达到平衡为止,如图 1.2, c 所示,这个过程一般需要 2—10 分钟,这时系統的温度叫做熔結温度。平衡时銅内含鍺的濃度就是由熔結温度来决定,温度越高,濃度就越大。一定熔結温度下对应鍺的濃度值一定,它可以由銅-鍺相图中液相綫(I) 求出,如图 1.3 所示。这时鍺的溶解总量决定于熔結温度、銅

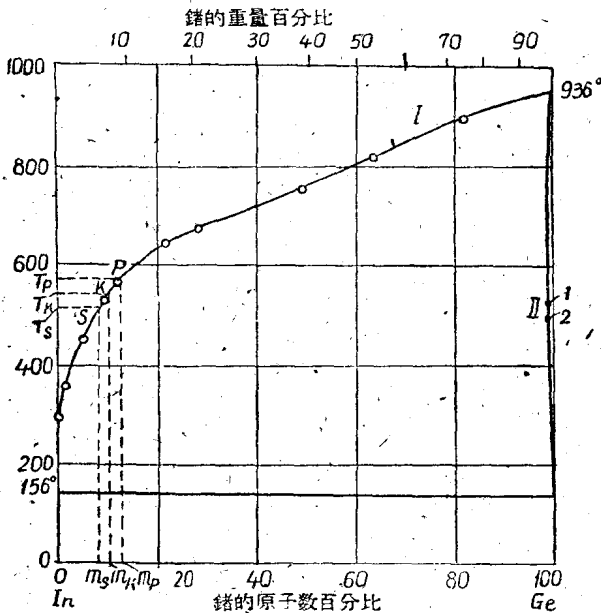


图 1.3 銅—鍺相图。

粒的大小。在結面积一定时,銅中鍺的总量直接决定了合金結的深度。所以在平衡的情况下,可以通过控制熔結温度、銅粒大小以及結的面积,来控制合金結的深度。但是在熔結時間比較短,而銅粒又比較大的时候,熔結过程来不及达到平衡,这时銅中鍺的溶解

总量就和温度、時間有很大的关系,而和錒粒的大小关系不大。

为了能够比較好的控制結的深度,就要求有一个确定的熔結温度,并且进一步要求当温度偏离熔結温度时,引起鍺的溶解总量变化較小。对于錒鍺的合金系統來說,要求我們把熔結温度选在 $300-600^{\circ}\text{C}$ 的範圍內(见图 1.3)。在有些实际問題当中, $p-n$ 結必須有足够的深度,这就要求尽量提高熔結温度,使得錒中鍺的溶解总量变大。因而通常把熔結温度选在 $500-600^{\circ}\text{C}$ 之間。

經過以上所述的过程,就使我們得到了一个錒、鍺的合金系統,然后使温度下降,在鍺的表面处就会有新的晶体生长出来,在这些鍺晶体中包含有足够量的錒,而形成 p 型鍺,如图 1.2, d 所示。这就是再結晶的过程。

我們可以用錒-鍺的相图来分析再結晶的过程。如图 1.3 所示,当温度为 T_p 时,系統处于状态 p , 温度由 T_p 下降到 T_k 时,系統由状态 p 变到状态 k 。这时錒中的含鍺量变少(由 $m_p \rightarrow m_k$),有一部分鍺成晶体析出,析出的鍺晶体中的含錒量由固相綫(II)的点 1 决定。然后我們繼續降温,由 T_k 到 T_s , 这时系統由状态 k 变到状态 s , 同时有一部分鍺成为晶体析出,鍺中的含錒量由固相綫上的点 2 决定。我們不断的降温,鍺就不断析出,一直到結晶完全为止。再結晶出来的这层鍺含有足够量的錒,形成一个 p 型层,他与原来的 n 型鍺片构成 $p-n$ 結。在界面两边两种相反的杂质濃度都很高,在分界面处形成了一个杂质濃度的突然改变,我們称这种結为突变結。

在用合金法作 $p-n$ 結时,通常还要考慮到下面几个問題:

首先必須选取适当的合金材料,对于 n 型鍺必須选取受主杂质作为合金材料,对于 p 型鍺必須选取施主杂质作为合金材料,这样才能制得 $p-n$ 結。同时还要求在冷却过程中热应力尽可能的小,否則由于热应力的作用,使得 $p-n$ 結发生裂痕,或甚至使結脫

落, 这样会使 $p-n$ 結性能变坏, 或根本不能使用。减小热应力的途径是选择适当的合金材料, 使它和鍺的热膨胀系数相差尽量小。实际上, 从Ⅲ、Ⅴ族元素中选出合乎这样要求的合金材料来是很困难的。解决的办法, 是选取較軟的合金材料, 例如 Pb、Sb、In 等, 使得在热应力的作用下, 合金材料发生形变, 从而减小結的受力。但Ⅲ、Ⅴ族元素中这样的材料仍然是不多的, 所以我们通常选取一个軟的合金材料, 在其中加入所需要的杂质, 通常軟的合金材料要占 95—99%, 而加入的其他杂质只占 1—10% 而已。选取合金材料的另一原则, 是要使鍺在合金材料中的溶解度大, 以制得合乎要求的 $p-n$ 結。根据上面的原则, 对于鍺、硅样品, 通常选用的合金材料为下表所示: [4]

	鍺	硅
n -型	銅, 銅鍺合金, 銅鋁合金	鋁, 鋁錫合金
p -型	鉛銻合金, 鉛砷合金	金銻合金, 錫銻合金

另外所选的合金材料要有一定純度, 使其不致含有有害的杂质, 因而影响到 $p-n$ 結的性能。

其次, 結的平坦与均匀也是要考慮的問題之一, 因为它直接影响了 $p-n$ 結的整流性能。这一問題产生的原因, 是由于合金材料与鍺的沾潤不良。結果造成如图 1.4[5] 所示的結不平坦。另外, 晶面的选择也很重要(特別对于高频晶体管), 由于鍺沿 $\langle 111 \rangle$ 晶面

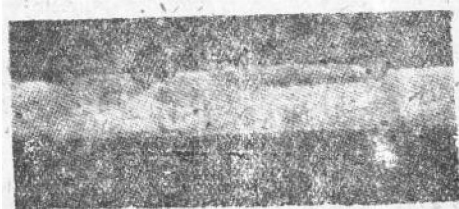


图 1.4 沾潤不好的合金結。

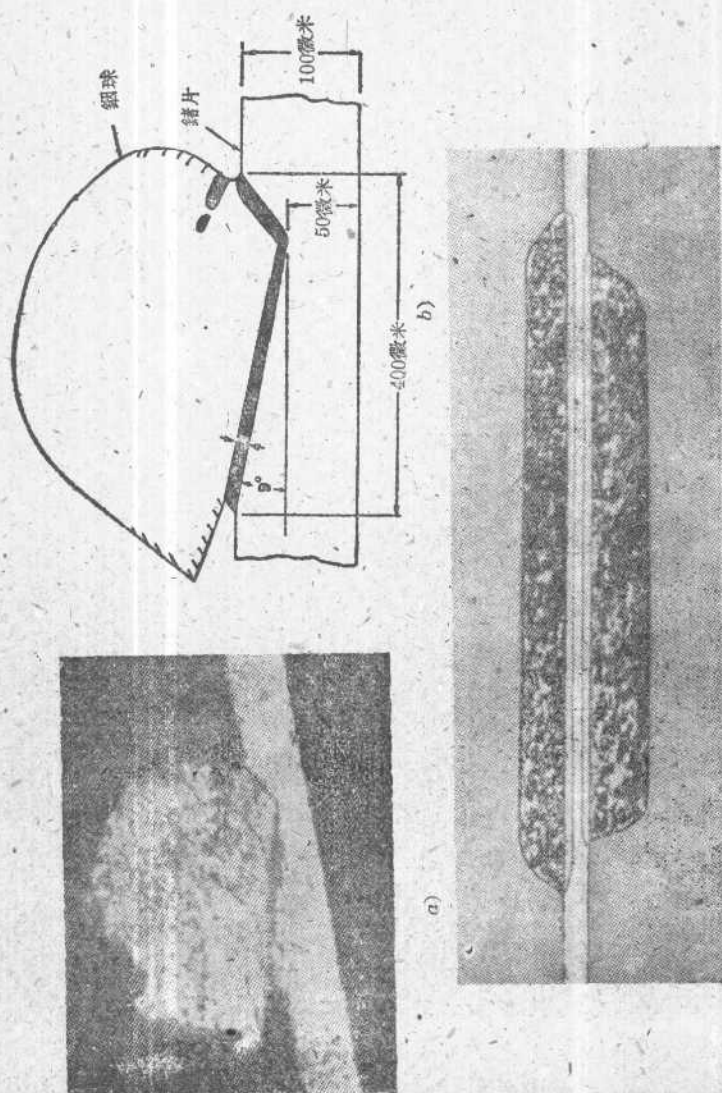


图 1.5 晶面方向对合金的影响。