

晶体管原理

南开大学物理系
1965.8.



目 录

结 论	1
§1. 晶体管的发展简史	1
§2. 晶体管的类型与应用	7
§3. 课程的内容及分析方法	11
第 一 章 Pn 结	14
§ 1.1 Pn 结的获得	14
§ 1.2 Pn 结中载流子及电流密度的分布	23
§ 1.3 势垒区复合及大注入对 Pn 结伏安特性的影响	32
§ 1.4 Pn 结的电容	38
§ 1.5 Pn 结的击穿	48
§ 1.6 Pn 结的突变特性	58
§ 1.7 整流器与二极管	65
第 二 章 Pnp 型晶体管基本工作原理	75
§ 2.1 Pnp 型晶体管为什么能放大	75
§ 2.2 Pnp 型晶体管直流特性	80
§ 2.3 Pnp 型晶体管的交流特性	93
§ 2.4 表面复合与基区电阻效应	112
§ 2.5 中频小功率晶体管	121
第 三 章 Pnp 型高频晶体管	128

§ 3.1	晶体管在高频工作时所发生的现象及原因	128
§ 3.2	晶体管在高频工作时的放大能力	140
§ 3.3	漂移型晶体管	148
第四章	PNP 型功率晶体管和高频功率晶体管	164
§ 4.1	限制晶体管功率输出的主要因素	164
§ 4.2	提高晶体管输出功率的途径	171
§ 4.3	高频 ^{功率} 晶体管	180
第五章	PNP 型开关晶体管	192
§ 5.1	开关三极管	192
§ 5.2	雪崩三极管	210
第六章	其他类型晶体管	218
§ 6.1	$PNPN$ 器件	218
§ 6.2	隧道二极管	229
附录一	讲义中所用主要符号表	245
附录二	国内外半导体器件的识别和代换	248
附录三	晶体管新旧型号对照表	257
附录四	锗和硅的特性	260

緒 論

晶体管是在近十多年发展起来的一种固体电子器件，它是采用半导体材料晶体制成的，不但具有真空管一样的整流、检波、放大、振荡、开关等性能，而且还具有真空管所没有的许多优点。因此目前晶体管已经获得了极大的发展和广泛的应用。

§1. 晶体管的发展简史

和其他新生事物一样，晶体管的产生和发展也是与社会经济、政治状况、工业生产及其他科学的发展紧密联系着的，我们可将晶体管的发展划分为三个时期。

1. 1895 ~ 1930 发展的初期

在无线电发展的初期，接受机中广泛使用的晶体检波器，便是最早的晶体二极管，它是用天然的半导体材料——矿石作成的。当时只知道这样做能检波，而不知其为什么能检波，因此对它存在的一些问题，也不知应如何改进，因此在1904 ~ 1906年出现了工作性能稳定可靠的真空管以后，在实际应用中晶体检波器就逐渐被真空管所代替。但是由于晶体检波器结构简单，价格低廉，不需要电源，所以仍有人在继续对其进行研究。不过人们更多注意的的还是对真空管的研究，再加之当时对晶体管的电学性质知识的缺乏，所以在这个时期中晶体管的发展是缓慢的。

2. 1930 ~ 1948 点接触二极管之出现

随着无线电技术向高频波段的发展，尤其是雷达技术的应用，真空管使用效率低的缺点就日益暴露出来，尤其是无法解决雷达中的检波问题，于是人们又重视起对晶体检波器的研究，由于此时人们对晶体的一些特性已经有所了解，能带论已被提出。同时，由于当时冶金水平的提高，一些很难提出的元素如硅及锗都能提得很纯。

于是在1943年人们就又用这些材料制出比矿石检波器好得多的点接触晶体二极管，成功地解决了雷达的检波问题。从此以后，晶体管在无线电技术上的应用就被重视起来，而且促使了科学家们对半导体的本质进行更深入的研究。总之，由于点接触晶体二极管的制造成功，使晶体管的发展开始了一个全新的时期。

3. 1948~现在

这个时期的起点是以晶体三极管的出现来划分的，就其发展来讲，这个时期又可分为四个阶段。

1). 点接触三极管的发现

由于晶体二极管和真空二极管的伏安特性很相像，这就使得人们屡次产生制造晶体三极管的念头。

由于当时超高频微波技术的迅速发展以及锗硅二极管在超高频技术中成功的应用，推动了人们来探索金属与半导体特性之本质，这时人们已经在研究发生于晶体二极管内部的物理过程，并试着改善和制造新的检波器，在这些工作的基础上，人们终于在1948年发现了点接触三极管的放大作用，使人们第一次看到用半导体材料做电子元件的可能性。点接触三极管一开始就以它的突出优点——体积小，重量轻，用电省，寿命长，结构简单坚固等引起人们极大重视，但是它也有不少缺点，例如噪声大，特性不稳定，输出功率小，从而就又促使人们对它进行了更大量的研究改进工作。

2). 合金面结型三极管的出现

点接触晶体管出现不久，很快就得到理论上的指导，1949年肖克莱就提出了 $p-n-p$ 和 $n-p-n$ 半导体面结型结构具有放大作用的理论，这时生产技术也大大发展了，例如，这时已能制出高纯度的铜、镓、锑等金属材料，特别是在半导体材料方面，由于1950年前后，成功地拉出了锗单晶，不久又拉出了硅单晶，1951年前后，发展了锗的区域提纯和硅的无担搁区域提纯，成功地制出了纯度高达8个“9”的锗单晶，大大满足了制造半导体三

极管所需的原材料,因此在1951年人们就用合金法试制成功第一个面结型晶体管,证实了肖克莱的理论,比起点接触型晶体三极管来合金面结型晶体三极管的性质是大大提高了,噪声大大减低,特性稳定,输出功率和功率增益增加,表1是点接触型,合金面接触型三极管和真空三极管主要特性的比较。

面接触晶体三极管的出现,标志着晶体管在发展上又大大向前跨进了一步,它使人们更深刻地掌握了晶体管内部的规律性,同时也指出了在实际中更广泛使用晶体管的可能性,当时在许多电子设备上,都有人研究晶体管在其上的应用,并且在低频放大与振荡方面的使用获得了非常的成功,同时,晶体管线路也获得了很大的发展,但这时的晶体三极管也还存在着不少的缺点,其中最主要的就是输出功率小,使用频率低,这样就推动着人们继续探索晶体管内部的规律。

主 要 特 征	诸 半 导 体 三 极 管		真 空 三 极 管
	点接触型	合金面结型	
功 率 放 大	20~30 分贝	30~50 分贝	20~50 分贝
A类放大时的效率	30 %	45~49 %	0.1~25 %
B类放大时的效率	90 %	95 %	70 %
使用期限(小时)	70000	90000	5200
额 定 功 率	25 mW	60 mW	0.1 瓦
极 限 工 作 温 度	70 °C	70 °C	500 °C
极 限 工 作 频 率	30~70 Mc/s	3~5 Mc/s	>100 Mc/s
1000赫时之噪声系数	45 分贝	15 分贝	10~30 分贝

3) 用扩散技术制造晶体管的成功

随着短波无线电的利用,合金结晶体管使用频率低的缺点就越来越突出,由于合金结晶体管本身结构和工艺技术的限制其使用频

率只能达到 $10 \sim 20$ 兆赫，而这频率是不能满足通讯、电视等电子设备需要的，同时由于某些方面也要求晶体管能有更大的输出功率，因此人们就围绕着高频大功率方面对晶体管进行大力改进，展开了一系列研究工作。提出了一些方法，在一定程度上改进了晶体管的频率和功率性能，但也都分别存在着一些的新问题。

在晶体管发展过程中，工艺技术的发展也起了很大的促进作用而且往往是一种新的管型都是与一种新工艺结合着出现，而在1955年左右利用扩散技术制造晶体管成功，更是在晶体管制造工艺上的一项有重大意义的改革。因为扩散过程可以使得晶体管的使用频率有可能提高到几百以至几千兆赫，于是在这基础上各种利用扩散法制造晶体管的方案，便大量提出，使晶体管的频率和功率特性同时都得了较大的提高。

与在改进工艺提高晶体管特性的同时，人们也还在寻找用新的作用原理制造更好特性的所谓新型晶体管，这项工作也获得了很大的成就。

新型晶体的出现

由于宇宙航行，导弹计标技术中迫切需要大量微波及毫微秒器件，因此新型晶体管中绝大部分都是为此而设计的，其中尤以参量放大器和隧道二极管的性能更为突出，参量放大器是在1957年提出的利用 $p-n$ 结电容随电压的非线性变化而制成的器件，使用频率可达10万兆赫，隧道二极管是在1958年提出的利用重掺杂的 $p-n$ 结在正向电压时的隧道效应而制成的器件，开关速度可达到2毫微秒，目前各个国家都围绕着寻求新的微波功率器件，微波宽频带器件和超小型器件，开展着大规模的研究工作。

由于火箭技术的发展对高温器件要求很迫切，因此高温器件也在大量研究，目前已作出在 $+500^{\circ}\text{C}$ 下进行整流的碳化硅二极管，制成的碳化硅隧道二极管能在 $+350^{\circ}\text{C}$ 下工作，开关速度达十分之几毫微秒，是很好的微波放大器。

总之，从1948年以后，晶体管的发展速度是突飞猛进的，在这个过程中曾出现过许多不同类型的晶体管。如表2中所示，但其中有的由于不能满足生产实际的需要，或是不适于投入大量的生产而逐渐被淘汰，所保留下来的管型也在不断解决存在的问题，进一步提高工作性能，从目前发展情况来看，晶体三极管在最高频率方面已可做到6000 Mc/s这样高的频率在大部分电子仪器设备中是足够使用的。在低频大功率方面，甚至较高频率（如几十兆赫）的大功率管也已能作到几百瓦，甚至几千瓦。因此目前最主要的任务是制出高频大功率晶体管，其次进一步发展半导体的亚毫米检波器、高速开关，设法降低晶体管特性受温度的影响，解决晶体管规格之统一性及稳定性都是当前很重要的研究课题。

工业生产与科学技术的新成就推动了晶体管的发展，同时晶体管的迅速发展也反过来促进了工业生产和科学技术的提高，以科学理论为例，现在的表面物理，半导体材料冶金，电化学等就是在半导体物理与其他科学的边缘上开拓的新领域。

发明年代	晶 体 管 类 别	制 造 工 艺
1942	点接触型 二极管	
1948	点接触型 三极管	
1949	面接触型晶体管(理论)	
1950	光电晶体管(点接触型)	
	场效应晶体管(点接触型)	
1951	面接触型晶体管(试制)	生长结(锗、双基掺杂)合金结
1952	面接触型晶体管	生长结(锗变速生长)
	单极场效应晶体管	"
	模拟型晶体管	"
	面接触型场效应晶体管	"
	面接触型光电晶体管	"

1953	面垒型晶体管 单极型晶体管 (实验)	应用面垒技术
1954	$n-p-i-n$ 型晶体管, 漂移型晶体管 双基极二极管	生长结 (硅双重掺杂) 回溶方法。
1955	雪崩型晶体管	生长结 (硅变速生长)
1956	扩散型晶体管	锗气相—固相扩散 扩散基极和双扩散 硅气相—固相扩散 扩散基极和双扩散
1957	$p-n-p-n$ 开关管 扩散型晶体管	生长扩散, 扩散回熔 液相—固相扩散, 生长扩散蒸发
1958	场效应晶体管 (Fetretron) 微合金扩散管 负阻二极管 空间电荷管, 拍式管, 参量放大器 隧道二极管 (理论)	熔解、扩散回熔 微合金扩散 气相—固相扩散
1959	隧道二极管	合金法

表

我国晶体管的发展

我国的晶体管和其他先进科学技术一样, 都是在解放后才迅速成长起来的, 解放前, 我国的工业基础极为薄弱, 更谈不上有什么电子工业和先进科学, 解放后在党的关怀和领导下, 我国迅速地建立起自己的电子工业, 同时大力发展无线电尖端科学技术, 1956 年在北京召开了全国的第一次半导体会议, 此后便在一些科学机关

开展了半导体的研究工作，随着1958年大跃进高潮的掀起，在许多科研机关，高等学校及工厂中，半导体的研究工作也蓬勃地开展起来，并且取得了很大的成绩，在短短的几年内，我们就提出了锗、硅材料，拉出了锗、硅单晶，制出了大量的大端器件，从无到有建立了自己的半导体工业，在国民经济及现代国防建设中的某些部门也已经采用了晶体管，……在这短短几年内我们几乎探索了半导体的全部领域，走过了资本主义国家几十年所走过的道路，以后1962年11月在北京又召开了^第二次全国半导体学术会议，1963年在石家庄召开了第三次全国半导体学术会议。从这两次会议上宣读的论文中明显的看到我国的半导体有了明显地进展，工作水平也有了较大的提高，一批青年的事业工作人员正在迅速地成长，但是我们也要看到由于国家建设的发展，自动化，计算机技术，现代国防都需要更多更好的晶体管，目前我们晶体管无论在品种上，数量上，质量上，都还不能满足要求，同时由于我们过去工业基础薄弱，底子较差，缺乏半导体生产工艺方面的资料和经验，因此我们今后要深入开展深入细致的研究工作，并且一定要与我国的具体条件结合起来，我们相信由于我们有党的领导，优越的社会制度，我国的晶体管事业一定会很快的达到世界水平。

§2 晶体管的类型与应用

1. 晶体管的类型

目前晶体管的型号非常繁多，而对其采用的分类方式也各有不同，下面我们按用途不同分类方式来介绍一些目前最常用的和最有发展前途的一些晶体管。

1) 晶体二极管

用于微波的变频及检波（已知达到 60 KMc/s ，波长 5 mm ）用锗、硅和砷化镓都可做成这种管子，在结构方面有点接触型的，

也有用扩散法制成台式的。

2) 功率整流器

用来作直流电流(效率最好的可达98%)在结构上都是面接触型的,在使用电流上,硅已达到 $80 \sim 180 \text{ A/cm}^2$,锗已达到 $50 \sim 100 \text{ A/cm}^2$,在反向耐压上,硅可达到600V,锗为200V。

3) 低频(或中频)小功率三极管

频率在20兆赫以下,功率在1瓦以下,可做低频振荡及放大用,绝大部分都是用锗制成的合金结型的晶体管,它又可分为 pnp 型和 npn 型的两种。

4) 功率三极管

这种管子频率都很低(小于 20 Mc/s)功率范围从几瓦到几百瓦,主要做功率放大用,锗、硅都可做为材料,一般锗的多采用合金结,硅多采用扩散结,电极形状采用梳形结构。

5) 高频晶体管

频率从 $20 \sim 4000 \text{ Mc/s}$,在结构上采用扩散结和扩散基区之做法,微合金扩散型晶体管和台面式晶体管就是这类管子的代表。

6) 高频功率晶体管

同时兼具频率在几十兆赫以上,功率在几十瓦以上的管子,在结构上台式管是目前认为最佳者,在工艺上是合金、扩散、蒸发等兼用。

7) 开关晶体管

它们象电真空器件中的闸流管一样,有开启和关断电路的性能,大功率有 pnp 器件,高速的雪崩二极管和三极管。

8) 其他新型晶体管

其中大部分是能用于微波放大,振荡,开关的晶体管,它们的特优点是除了有很高之使用频率以外,还有极低之噪音,参量放大器和隧道二极管是当前最主要的两种微波晶体管。

最后要说明的是以上各类晶体管之间的界限也并不是截然分开

而不可逾越的，有时同一种管子即可属于这一类型又可属于另一种类型例如台式管就是这样。

2. 晶体管的应用

现在晶体管已经被广泛地应用到无线电电子学的许多方面，例如一般放大器，接受设备、收音机、助听器、电视机等，而且表现出很大的优越性，这是大家已经知道了的，在这里只想谈谈由于晶体管所独有的特点就决定了它将在某些方面的应用中更能发挥出巨大的作用，在此我们可再详细地看看晶体管的主要特点。

1) 特点：晶体管的特点，总括起来有以下几个方面。

i. 体积小，重量轻，以 $\pi 6$ 型号晶体管为例，其最大高度（不标引线）为 5.6 mm ，最大直径为 11.2 mm ，引线长 $2.5 \sim 4 \text{ mm}$ ，最大重量为 2 g ，其他型号之晶体管与此是相近的，一般说来，晶体管在重量上比真空管要小 10 倍，在体积上要比真空管小 20 倍。

ii. 寿命长，真空管的使用时数只有 $500 \sim 1000$ 小时，而晶体管的使用期限大约为 7 万 $\sim$ 9 万小时，也即差不多可日夜连续工作十年。

iii. 工作电压低，耗电省，晶体管一般工作电压为 $2 \sim 3$ 伏，电压最低到 1 伏时也还能正常工作，因晶体管无灯丝，所以耗电很少。

由于晶体管这一特点，就使得它可以用电池供电，甚至可用日光电池和煤油灯发电机供电，这是在某些方面的应用中是很重要的。

iv. 机械性能好：晶体管一般采用金属外壳封装，所以不易碎裂，它可经受住 10^4 g 加速度的冲击。

v. 因无灯丝所以不需要预热，接通电源后能立即工作。

vi. 制造过程及所需设备比真空管的简单。

2). 应用：由以上所述的晶体管的特点，我们可以看出它将在以下几个方面的应用中更能表现出巨大的优越性。

i. 计算技术和自动控制

它们是具有大量电子器件的设备，晶体管体积小，耗电省，寿命长这几点对其有着重大意义。体积小，可以使整个设备做得灵巧，耗电省可以节约大量电能；寿命长可以使工作结果准确可靠。计标机体积的减小，不但可使其变得灵巧，而且对于提高计标速度也很有好处。

ii. 火箭人造卫星等星际航行中通讯设备，显然，晶体管的体积小，重量轻，工作电压低和机械强度高，寿命长，在这里是很重要的。体积小，重量轻的意义不必再解释，工作电压低就可采用日光电池供电，使整个设备会更加轻便。机械强度高就能经受住很大的加速度。

iii. 军事上，由于晶体管的体积小，重量轻，耗电省，就可把设备做得小巧，轻便，易于携带，另外在雷达接收机中，若采用参量放大器、隧道二极管等这类半导体微波放大器以后，可使其灵敏度有很显著的提高。

iv. 在更换电子管很困难的设备（例如水底电缆和地下电缆的放大器）中使用晶体管非常合适。

上面我们是以晶体的特点（也即优点）谈到它的应用方面，现在我们再简单地谈一谈晶体的缺点及其给应用带来的局限性，现在看来晶体的缺点主要有以下几类：

1) 使用频率，功率还不够大：因此，现在晶体管还只能作小功率的发射和扩音，一般无线电广播需要大的功率，射电天文上需要的高频同时又大功率的发射管，目前晶体管还不能胜任。

2) 电学特性受温度影响很大：这类的缺点是由半导体的电导随温度灵敏变化造成的，这样不但使晶体管在温度经常变化的环境下不能使用，而且在一些高温的环境下也不能使用。

3) 稳定性差：即晶体管之特性随时间变化。这主要是由于制造过程中对清洁处理和密封做得不好。以致使晶体管的特性经受不了环境气氛的影响。

4) 产品规格不均匀：在同样条件下生产出的管子性能可以相差很远。这主要是由于生产中不能全部机械化，还有一部分手工性劳动所造成的，这样就给晶体在要求有统一规格的电子器件设备中的应用中带来了很大的困难。

如何克服上述这些缺点，以扩大晶体管的应用范围，就是现在重要的研究课题。目前在这个方面也已经取得了一些成绩。

§3. 课程的内容与分析方法

1. 课程的内容：

晶体管原理是把晶体管当作一个电子学元件来专门研究其内部作用原理的课程，从而揭示和掌握晶体管内部作用的客观规律，使我们可以能动地改进和提高器件的性能和研制新型的晶体管，但由于晶体管是一门新的科学，还正以极高的速度向前发展，许多问题都还在探索的过程中，至今尚未得到彻底的解决，再加之教师水平和课程学时的限制，所以我们在对于其中的问题不能一一评述，而只能把现在看来总结较好的最基本的一些内容（不包括制造工艺中的一些专门问题）介绍给大家，其基本内容包括以下四个方面。

1) 晶体管的基本作用原理，例如 $P-N$ 结二极管为什么能整流？ PnP 型三极管为什么能放大等，在这方面只讨论面结合型晶体管的情况，这是因为，点接触型晶体管的作用机构，直到目前还是一个有待研究的问题。

2) 晶体管放大性能与使用频率功率的关系，在这里要说明前者如何随着后者改变，以及后者为什么引起前者改变的原因，通过这些问题的讲述，能使我们对晶体管的工作特性，有一更深入的认识。

3) 晶体管的性能与其结构，材料间的关系，例如，晶体管的各个参数与晶体管的几何形状，尺寸大小间的关系，与所选用的材

料，以及材料的电阻率，寿命等之间的关系，从而使大家能掌握晶体管之改进方向。

4) 在把以上基本问题分析完了之后，我们还尽量介绍一些目前晶体管发展的水平及将来发展的动向。

其具体内容包括六章，我们也分成三个部分：

(1) 第一部分：

包括第一章 $p-n$ 结，因为 $p-n$ 结是结型晶体管的基础，所以我们在课程开始先把 $p-n$ 结的主要特性介绍清楚，这一部分也可以说是我们整个课程的基础。

(2) 第二部分：

包括第二章晶体三极管的基本作用原理，第三章高频晶体管，第四章功率晶体管和高频功率晶体管，第五章开关晶体三极管，这部分主要是分析 pnp ，或 npn 这种结构的晶体管的放大原理以及它在高频，大功率，和大信号使用下的情况，因为这种晶体管是目前研究最深，数量最多，应用最广的类型，因此我们对它的讨论也是细致的，这一部分也可以说是我们整个课程的中心。

(3) 第三部分：

包括第六章，其它类型的晶体管，在这一部分里，我们介绍一些用其它原理制成的晶体管，以开拓我们的眼界和思路，从而建立起一个对晶体管的全部的，确切的认识，因为这样的晶体管类型是相当多的，所以我们也只能介绍其中较为主要的几种，例如：参量放大器，隧道二极管等。

2. 分析方法：

我们来用之分析方法归纳起来可分成下列四类：

1)、不论在分析作用原理还是在分析特性与结构及材料的关系时，始终是着眼于器件中载流子的具体运动过程，也即是从物理机构出发，分析在各种情况下的载流子，电流密度，及电场等在器件中的分布及其如何变化来得到晶体管的各个特性，这一类是我们分

析方法的核心。

2) 分析时先定性后定量，即先从物理机构出发把作用的机理阐述清楚，然后再进行定量的计标，以求得特性与结构，材料间的数量关系。

先简单后复杂，即从简单的，理想化的模型入手先把问题的实质和关键抓住，然后再逐一的考虑实际晶体管中不可忽略的各个效应，对前面的结果加以修正和补充。

3) 分析中有时要采用使问题简化的假设条件：这是专门组课不同于基础课的很突出的特点，这一做法在定量计标中的复杂部分尤为重要，因为这样就能使我们能较快的得到符合客观规律的简化的解，当然简化中也必须重视准确度，如果不符合客观规律的作了一些近似假设，那么得出的结果也就没有价值了。

4) 在分析中尽量结合实际例子，例如结合讲述内容给出一些典型晶体管的结构和特性数据等，把理论分析的结果形象化。

最后把课程之目的再向大家明确一下：

我们这门课的目的，就是向大家介绍晶体管中的一些基本问题，并通过这些内容的介绍，使大家学习到如何应用自己的知识（数学、半导体物理……）来分析晶体管中问题的方法，以及如何结合现实条件的可能来解决这些问题的途径。掌握了这些问题内容大家自己就可以更广泛的去阅读关于讨论某一具体问题的文献资料，或从事生产和科研时也大概该知道应该如何着手进行工作。总之，我们这门课程之目的就是为大家今后在这方面更进步的学习或从事实际工作打下一定的基础。

第一章 $P-N$ 结

在一个半导体的单晶体材料中，如果有一部分是 P 型而另一部分是 N 型，则就形成了一个 $P-N$ 结， P 型导电和 N 型导电刚好完全补偿之处称为结面，在结面附近的由一种导电类型转变为另一种导电类型的区域，称为过渡区（或称转变区）， $P-N$ 结是半导体结型器件中最重要的一部分， $P-N$ 结中的物理过程是研究这些器件的基础。

§ 1.1 $P-N$ 结的获得

目的是介绍 $P-N$ 结的制备原理及各种结的特点：

获得 $P-N$ 结的方法很多，用不同方法制得的 $P-N$ 结又各有不同的特点。在这里，我们以锗材料为例把目前晶体管工艺中最主要的几种方法介绍如下：

1. 合金法：

即利用高温下半导体材料与杂质元素形成合金，然后降低温度使^半导体材料再结晶，从而把杂质掺入半导体材料中改变了原来的导电类型来获得 $P-N$ 结，这样做成的结称为合金结。

现以铜锗的合金过程为例简单的说明一下合金法形成 $P-N$ 结时过程。

先将铜粒置于 N 型锗片上，如图 1.1 a 所示。（图见次页）然后放入炉中加热在 155°C 左右时铜开始熔化，如图 1.1 b 所示，铜熔化以后锗原子就向铜中溶解，随着温度的升高，锗向熔铜中的溶解量加大，当合金深度达到我们的要求时，就不再使温度上升而保持一定的时间，这时系统的温度称为熔解放度，如图 1.1 c 所示，然后使温度下降，这时熔铜中的锗就要再结晶出来，因在再结晶锗