

# 美国的半导体硅工业

(内部资料·注意保存)

一九六二年十二月

# 美国的半导体硅工业

(内部资料 注意保存)



1962.12

## 內 容 簡 介

随着科学技术的飞跃发展，半导体工业在近代化技术和国防尖端中占着日益重要的地位。而发展半导体的基础在于生产质量优良的原材料。高純度硅是目前最主要的半导体材料。

这份材料是根据冶金工业部的指示，为了解美国半导体硅工业发展情况而写的。主要評述了美国的半导体硅工业发展概况及特点，共分五大部分：首先介绍了硅的历史、资源、物理化学和电学性能及在工业、科研和国防尖端上的应用；其次列述了美国半导体硅工业发展簡史、生产企业建設及水平、产量、消費、进出口、价格和外贸情况，并列举主要技术經濟統計指标；第三部分評述半导体硅的生产方法和科研技术，包括純硅制取、化合物制备与提純、各种高純硅制备方法、物理提純和拉制单晶等；第四部分介绍美国半导体器件生产和研究；最后，对于美国半导体硅工业的特点及发展趋势也給以評論。可供有关领导干部、从事科学研究和生产的工程技术人员、設計人員及大专院校师生参考。

本材料由罗英浩同志編写，經楊文林、王师孟同志审閱，夏文沂同志参加了部分資料搜集工作。

由于我們缺乏經驗，再加上水平不高、時間仓促，缺点和錯誤在所难免，敬希指正。

編 者

1962.12.

# 目 录

## 一、前 言

- (一) 概述..... 1
- (二) 硅的历史..... 2
- (三) 硅的资源..... 3
- (四) 硅的性质..... 4
- (五) 硅的用途..... 9

## 二、美国的半导体硅工业情况

- (一) 美国的半导体硅工业发展简史生产企业的  
工厂建设及现有水平.....17
- (二) 美国半导体硅的生产消费和使用情况.....28
- (三) 美国半导体硅的进出口、对外贸易和市场  
价格.....36

## 三、美国半导体硅的生产方法和科学研究技术发展概况

### (一) 纯硅制取方法研究

- 1. 合金法.....48
- 2. 酸浸法.....49
- 3. 金属还原二氧化硅.....49
- 4. 用氯化钙还原四氟化硅.....49
- 5. 用碱金属或铝还原四氟化硅或碱金属的  
氟硅酸盐.....50
- 6. 将二氧化硅熔融入碱金属氧化物、氯化  
钠—氯化铝或氯化铝中炭极高溫电解.....50
- 7. 工业硅真空蒸馏.....50
- 8.  $\text{Si} + \text{SiO}_2$ 法.....51

### (二) 半导体高纯度硅制取方法研究

- 1. 原料——各种硅化合物的制备与提纯.....51

(1) 四氯化硅的制备与提純	51
(2) 三氯氢硅的制备与提純	57
(3) 四碘化硅的制备与提純	60
(4) 硅烷的制备与提純	64
2. 高純度硅的制取——化学法	
(1) 杜邦法(四氯化硅鋅还原)	68
(2) 貝尔法(四氯化硅氢还原)	72
(3) 西門子法(三氯氢硅氢还原)	79
(4) 培西尼法(三氯氢硅热分解)	83
(5) 硅烷热分解法(I.S.E法, ST&C 法或 IT&T法)	86
(6) 四碘化硅热分解法	89
(7) 四碘化硅氢还原法 (西尔凡尼亚法)	93
(8) 四氯化硅鈉还原法(Aries法)	95
(9) 四溴化硅法(鈉、鋅、氢还原)	95
(10) 歧化法	97
(11) 其它方法	98
(12) 各种制取方法的比較	99
3. 高純度硅的物理提純	
(1) 无坩堝区域熔炼法	103
(2) 水平区域熔炼法	106
4. 硅单晶的制取	108
<b>四、美国硅半导体器件的工业生产和研究情况</b>	
(一) 美国硅半导体器件的生产概况	115
1. 晶体管生产水平	116
2. 二极管及整流器生产水平	118
3. 半导体器件工厂設備的生产能力	123
4. 半导体器件的制造方法	124

5. 自动化生产·····	125
6. 人員僱用情况·····	126
7. 落貨量及价格·····	127
(二) 美国半导体器件的研究及发展情况·····	129
(三) 美国半导体器件的进出口和对外貿易情况·····	132
(四) 美国半导体器件的生产新技术及发展趋势	
1. 外延生长法·····	134
2. 微型电子組件·····	136
3. 提高可靠性·····	137
4. 降低产品价格·····	138
5. 电致发光·····	139
<b>五、美国半导体硅工业的特点及其今后发展趋向的     估计和看法·····</b>	<b>140</b>
<b>六 参考文献 (249篇) ·····</b>	<b>152~163</b>

# 一、前 言

## (一) 概 述

近二十年来，世界科学技术的发展是惊人的，在第二次世界大战期間，由于軍事上无綫电电子工业及雷达技术的兴起，促进了半导体晶体管的运用。特别是近几年来，宇宙飞船、航空工业、火箭、导弹、人造卫星、电子计算机、自动化生产和远距离控制操纵装置的不断發展，进一步向半导体器件的性能提出了更高要求并为其使用开辟了无限广阔的前途。

随着科学技术的如此飞跃发展，半导体工业在近代化技术和国防等工业部門中占着日益重要的地位。而发展半导体的基础在于生产质量优良的原材料，因而随着半导体电子工业的发展，促进了人們对制备半导体材料的科学——半导体冶金給予很大重視并进行了大規模的研究工作。半导体冶金的重要任务是：提高某些材料的純度，使其电阻率达到本征电阻，同时将高純度的半导体材料制成有一定电学性能的、符合所需尺寸的单晶体。

人类在开始制造半导体器件时，最先使用的材料是氧化亚銅（1926年左右就已进入实用时期）；1930年間，开始以硒整流器代替了氧化亚銅；从那时起至1946年間，硒就成为制造半导体的主要原料。此后，半导体領域的研究和生产情况大为改观，一方面由于在理論上得到了深入研究而发展成为物理学的独立領域，另一方面由于以晶体管为中心的許多新产品的陆續发现（鍺整流二极管——1948年，硅整流二极管——1953年），致使半导体工业生产发展成为現代化的大企业。在許多制造半导体的原料中，目前公认为最优越和最主要的是鍺和硅。这两种材料，鍺研究得較早，制取方法較成熟，主要問題是缺乏原料。目前全世界每年生产鍺60~70吨，但有逐年下降趋势，它愈来愈被硅所代替，这

主要是由于以下原因：（1）硅的自然資源丰富，取之不尽，用之不竭；（2）硅制成的半导体器件較之硒、鍺有一系列更优越的性能。例如①具有更好的耐高溫稳定性，能在更高的溫度下工作（鍺在 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ ，硅能在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）；②体积小（在同样的体积下硅的功率較鍺大四倍）；③重量輕；④维护簡便；⑤能在更高的电场下工作（鍺在1000伏，硅能在5500伏）；⑥更重要的是硅的室溫电阻率目前已經能达 1000 欧姆-厘米以上，寿命达 1000 微秒。而在实验室条件下，用西德西門子法已能制出硼含量仅 $10^{11}/\text{厘米}^3$ 、电阻率高达 150,000 欧姆-厘米的 P 型硅<sup>[9, 249]</sup> 因此硅的生产愈来愈得到发展。美国在 1959 年生产高純硅 36 吨（鍺 20 吨）1960 年增加到 41 吨以上（不包括太阳能电池級）（鍺 24 吨）。目前，硒与鍺所起的作用愈来愈小，其它新材料（如金属間化合物、有机半导体及玻璃状半导体等）也还不成熟，故最近 3~4 年内半导体的发展主要看是否能得到純度很高的硅单晶，否則器件的发展就会受到限制。

## （二）硅的历史

人类在古代就已經知道硅质材料可作为玻璃原料。在 1771 年 Scheele 制成氟化硅并将其水解生成硅酸。以前认为二氧化硅为元素，1808 年 Davy 首先否定这种說法，断定硅石（二氧化硅砂）不是元素而是一种化合物。1811 年 Gay-Lussac 和 Thenard 将  $\text{SiCl}_4$  通过紅热的金属鉀曾得到极不純的无定形硅。1824 年瑞士化学家 Berzelius 用此法才首先成功地制出元素硅，他将产品长時間浸出以淨化除掉副产物氟硅酸盐；另外他还把氟硅酸鉀与金属鉀反应制出元素硅，并用水分解所生成的硅化物。故 1824 年这一年公认为元素硅的最先发现年代。

一直到 1854 年法国的化学家 Deville 用电解不純的氯化鋁鈉的方法，第一次制出結晶状硅，同时由約含 10% Si 的粒状熔体中熔入鋁的方法获得了光亮的小片状硅。<sup>[2]</sup>



1907年 potter 所发明的方法是目前大规模生产工业硅的前身,他研究了硅石( $\text{SiO}_2$ )与碳的还原反应,生成了中间物 $\text{SiC}$ ,进一步反应而生成元素硅<sup>[3]</sup>。Becket(1921年)<sup>[4]</sup>及Tucker(1927年)<sup>[5]</sup>先后发明了用酸洗法净化而得到纯度较高的元素硅(达99%Si以上)。直到1949年美国杜邦公司的Lyon和Olson首先发明了用金属锌还原四氯化硅的方法制得“超纯”硅,但当时纯度仅为99.97%<sup>[6]</sup>,然后建厂并于1951年开始投入工业规模生产。此后半导体硅工业便开始迅速发展,出现了其它更优越的新方法,其发明者及发明年份、方法实质将在下面第三部分“美国半导体硅的生产方法和科学研究技术发展概况”中介绍。

### (三) 硅的资源

硅是分布最广、含量最丰富的元素之一,占地壳总含量的28%,仅次于氧(在地壳中氧占50%,其他所有的元素共占22%)。硅常常呈与氧结合的形态,例如呈硅石或金属的硅酸盐状态存在。硅以某种形态构成砂石的78%,火成岩的60%,頁岩的58%,以及石灰石的5%。地球表层平均含60%的硅石( $\text{SiO}_2$ )。

硅以硅石( $\text{SiO}_2$ )形态存在于石英中,这些石英在许多大矿床、山脉及砂土中到处都可发现。大部分次等玉石是由含有微量杂质的石英所组成。

甚至某些植物以及动物机体中也通过水溶液吸收硅石,进行同化作用。在测量无数星球及陨石时也发现有硅石存在。<sup>[2]</sup>

制造工业硅的原料是纯石英砂(含 $\text{SiO}_2$ 99.5~99.7%)及纯石英脉矿。制造半导体高纯硅则用工业硅为原料,一般是将其先转化成卤化物,然后进行还原或热分解。

对于锗来说,制取工艺方法较定型成熟,而资源则是最基本的问题。虽然在锌矿、铜矿、煤以及褐煤中都含有微量锗,但很稀散,故直接提取困难,产量和回收率也很低。反之,硅倒是无限

存在的，可以說是取之不尽、用之不竭，这一点是硅的絕對有利条件。尽管目前高純度硅的制造还存在一定困难，生产和拉晶工艺还不够成熟，故价格还較昂貴，限制其普遍应用，但由于其資源丰富，在制取工艺技术方面进一步加以改进后，价格势必会降低，而得到越来越广泛的应用。

#### (四) 硅的性质

##### (1) 物理性质

随着无綫电电子学等先进科学技术的飞跃发展，对高純度半导体材料提出了更高的要求。近几年来半导体硅的制备和提純方法、純度以及化学分析和物理檢驗技术有了很大改进和提高，同时由于大功率半导体器件（整流器、晶体管）的发展，更加促进对硅的性能尤其是高純度半导体硅的結晶学电学和光学等物理性能的深入研究。高純度硅具有一系列較鍺优越得多的半导体性能。由于資料有限，加上目前对于高純度完整性硅单晶的制备方法以及分析檢驗技术还不够完善，因而要列出較完整的硅的物理性能还有困难，仅就現有发表的部分数据經比較归納列于表1〔2〕。

由上表可知硅的禁帶寬度較鍺的大（硅为1.12电子伏，鍺为0.7电子伏），故将硅的价电子激发到导帶上所需的能量必然比鍺多，成为本征导电时的溫度也較高，鍺在130°C附近成为本征导电，而硅在250°C附近才能成为本征导电，因而比鍺在溫度較高时也沒有失去N型或者P型的特性，故高溫时也可以使用，同时电流容量很大也是有利的一点。更由于完全同样的理由，硅的半导体器件比鍺的耐反向电压高，所以能制造高性能晶体管和整流器。

在常溫下本征硅的电阻率是230000欧姆-厘米，由此值可算出电流載流子的数目相当于 $10^{10}$ 个/厘米<sup>3</sup>以下。換句話說，在 $5 \times 10^{12}$ 个的硅原子中含有大約一个杂质原子时才能成为本征的。目前已經制得本征鍺，但还未制出本征硅，根据文献报告目前所能

表 1 硅的物理性能

编号	项 目 及	数 据
1	原子序数	14
2	原子半径	11.17 Å
3	原子量	28.09
4	原子数目/厘米 <sup>3</sup>	$4.96 \times 10^{22}$
5	沸点	2480°C (4496°F)
6	阴极发光 (激活时所需最低电压)	
	无定形硅 (黄白色)	1600
	晶状硅 (红色)	2400
7	热膨胀系数	
	15~1000°C (59~1832°F) 平均数值	$4.68 \times 10^{-6}$
	25°C	$4.2 \times 10^{-6}$
	-157°C (-250.6°F)	0
	在液态空气温度	负值
8	颜色	
	无定形硅	暗褐色
	石墨状硅 (Graphitoidal)	黑色, 六边形薄板
	晶状硅	暗靛灰色, 细晶体为透明及亮橙色
9	临界压力 (大气压)	1450
10	临界温度 (计算)	4920°C (8888°F)
11	晶体结构	立方晶系 (与金刚石一样) 八面晶体, 每单位立方体有 8 个原子, 立方体边长为 5.42~5.43 Å, 无定形硅及晶状硅有着同样的 X 射线衍射图。
12	介电常数	12
13	电阻率 (欧姆—厘米)	
	-190°C (-310°F)	$2 \times 10^3$
	300°C (572°F)	15
	500°C (932°F)	0.4
14	禁带宽度 (能隙)	1.12 eV (电子伏)
15	熵 (卡/克分子/°K)	
	固体硅	
	298°K	4.50

編号	項 目 及 数 据
	500°K 7.58
	1000°K 11.85
	1500°K 15.48
	液体硅
	2000°K 23.75
	气体硅
	298°K 40.13
	500°K 42.76
	1000°K 46.14
	1500°K 48.20
	2000°K 49.66
16	自由能 (卡/克分子/°K) $\left[ \frac{-(F-H_{298})}{T} \right]$
	固体硅
	298°K 4.50
	500°K 5.46
	1000°K 7.70
	1500°K 10.56
	液体硅
	2000°K 12.29
	气体硅
	298°K 40.13
	500°K 40.63
	1000°K 42.55
	1500°K 44.12
	2000°K 45.31
17	硬度
	目氏 (Mohs) 7.
	布氏 (Brinell) 240
18	燃烧热 (Si→SiO <sub>2</sub> ) (卡) 191,000
19	焓 (热含量)
	固体硅 (H <sub>T</sub> -H <sub>298</sub> )
	500°K 1.06
	1000°K 4.15
	1500°K 7.37

續表 1

編号	項 目 及 数 据
	液体硅
	2000°K 22.92
	气体硅
	500°K 1.065
	1000°K 3.60
	1500°K 6.12
	2000°K 8.70
20	熔化热 (千卡/克分子) 11.1
21	蒸发热 (卡/克分子) 71000
22	晶格常数 [25°C(77°F)] $5.429 \times 10^{-8}$ 厘米
23	磁化系数 (含0.085%Fe的硅) $0.13 \times 10^{-6}$
24	熔点 1420(2590°F)
25	迁移率 (300°K)
	电子 1300厘米 <sup>2</sup> /伏·秒
	空穴 500厘米 <sup>2</sup> /伏·秒
26	弹性模数 (磅/吋 <sup>2</sup> ) 15490000
27	裂变模数 (磅/吋 <sup>2</sup> ) 9046
28	分子旋轉能 (由石英計算出) 0.27
29	塑性序数 (Plasticity Number) 89.3(Pt=116)
30	反射比 (磨光的工业硅, 在可見光段) 26~35%
	兰色光段最高, 向紅外線区迅速下降
31	折射系数 (折射率)
	$\mu$ 3.87
	$\mu_K$ (绝对系数) 0.47
	紅外線区 $\left\{ \begin{array}{l} 3.5 \text{ (在 } 1.2\mu) \\ 3.4 \text{ (在 } 2.6\mu) \end{array} \right.$
32	电阻率 (本征硅) (300°K) 230000欧姆-厘米
33	比重 2.33
34	比热 (C) [99.2%Si]
	0°C 0.1597卡/克/°C
	0~100°C 0.181卡/克/°C
	計算公式: $C = 0.165428(\theta - 17) + 0.0001584310(\theta - 17)^2 - 0.0000003742(\theta - 17)^3$
35	热导率 (卡/厘米/秒/°C) 0.20

編號	項 目 及	數 据
36	蒸气压 (毫米汞柱)	
	1920°K	1
	2120°K	10
	2360°K	100
37	波动頻率	
	紅色光	$13.57 \times 10^{12}$
	紫色光	$3.69 \times 10^{15}$
	$\gamma$ -射綫	$9.6 \times 10^{12}$
38	体积压缩率	$0.98 \times 10^{-12}$

(厘米<sup>2</sup>/达因)

制得的硅的最高純度是用西門子法制得,其室溫电阻率为150,000 欧姆-厘米, P型, 硼含量仅  $10^{11}$  个/厘米<sup>3</sup>, 相当接近于本征的<sup>[9][249]</sup>。随着技术的发展相信真正的本征硅不久是会达到的。

## (2) 化学性质<sup>[2, 7, 8]</sup>

硅位于元素周期表中的第IV族。硅的許多化合物以及在許多化学反应中的行为都与碳很近似。这方面最重要的是导致了(聚)硅酮 (Silicone) 及有关化合物的制成。硅也与鋳、錫和鉛近似, 与IV<sub>B</sub>族元素(鈦、鋯、鉛及鈷)的近似性較差, 并且近似程度随着这些元素原子量的增高而降低。

硅一般是呈四价状态, 其阳电性較金属低, 在有些硅化合物中, 硅呈阴离子状态。

硅极易与卤素(氟、氯、溴、碘)化合, 生成  $SiX_4$  型的化合物。硅在空气中很难燃烧, 而在紅热溫度下与氧反应, 在600°C与硫反应, 在1000°C与氮反应。在电炉中硅与硼、碳、鈦和鋯化合。

硅易溶解于熔融的鎂、銅、鉄及鎳中形成硅化物。硅也溶解于鋁及銀中, 在冷凝时呈晶体析出。硅溶解于气态及液态的HF, 但不受任何浓度其它酸(硝酸、盐酸、硫酸等)作用。硅能溶解

于  $\text{HNO}_3$ — $\text{HF}$  的混合酸中。在紅热状态下，硅与水蒸汽緩慢作用并釋出氢气。

在高温下，硅能还原大多数氧化物。对于析出純金属或硅化物來說，硅粉末是一种很好的还原剂。例如已为大家所熟悉的 pidgeon 法就是利用硅还原氧化鎂来制取金属鎂。硅能与熔融的苛性碱、碳酸鈉、重鉻酸鉀、氯酸盐以及硝酸盐起反应。

这些性质对于硅的制取及应用有很密切的关系。

## (五) 硅的用途[2,7,8,9,10~32]

### 1. 工业純硅的用途

含硅在 95.5~97% 的工业硅，用于冶炼鋼和鋁的硅热法中及与碱溶液作用制造氢气；含硅在 98% 的工业硅，主要用于制造硅鋁合金或硅銅合金；含硅在 99% 的工业硅用于高质量的特种合金。在电弧炉中用碳还原二氧化硅所得工业純硅 (97%) 經過酸浸淨化后純度可达 99.75%~99.8% (主要杂质是 Fe、Al、C、B 和 P)，这种純度的硅，在第二次世界大战中曾用来制造雷达及其它微波設備中的点接触二极管。但这种酸浸的硅不能用来制造更新式的半导体器件，例如整流器与晶体管，这方面要求更高純度的硅——半导体高純硅。

硅可与陶瓷材料一起燃烧形成耐热制品，或者与碳化合产生一种难熔的化合物  $\text{SiC}$ ，这是一种高温材料，其中有些硅仍然是呈元素状态存在，近来已发现高純度  $\text{SiC}$  还是一种性能极优良的高温半导体材料。

由于硅具有抵抗任意浓度的酸的耐蝕性能 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{HF}$  及它們的混合物，但  $\text{HF} + \text{HNO}_3$  除外)，而且又耐高温等特性，所以在工业上和科学上有很大价值。用硅浇鑄的仪器零件，具有很高的硬度及特殊的抗酸性，但可惜对硅的鑄造性尙了解得不够，在浇鑄硅这种困难的工艺問題上尙研究得不多。据报导在美国，以硅为主要成分的鑄件已經在制作化学仪器、管

子及坩堝方面获得了专利权。〔2〕

硅能够像铍和铯一样在由钨丝或烧结氧化钍 ( $\text{ThO}_2$ ) 制成的容器中蒸发。它能由汽相中从  $\text{NaCl}$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  载体上沉积出来。利用氢还原  $\text{SiCl}_4$  方法可以把硅复盖到金属表面，例如钢和钨就可以用这种方法进行“硅化”处理。目前在高温涂层方面，用  $\text{SiCl}_4$  制的转换涂层在铌—钽—钼合金上，其使用温度达  $1260^\circ\text{C}$ ，使用时间40小时； $\text{SiCl}_4$  制的涂在铌—钽—钼合金上的硅涂层用  $\text{MoO}_3$  浸渍，使用温度  $1260^\circ\text{C}$ ，时间70小时，用半导体纯硅制的钨涂层，使用温度  $1815^\circ\text{C}$ ，使用时间10小时。〔9〕

硅可作为自动氧化的催化剂。纯度较高的硅则用作光电管的元件。在酸碱电位滴定中，硅可作为电极材料。牙科大夫所用的或其它方面用的镜子就是用电沉积法形成一层硅的反射表面。

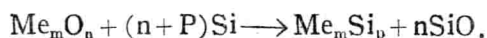
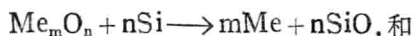
硅在制备各种硅化合物方面的应用已经获得很大发展。最近在工业上用硅作为合成聚硅酮的原料方面，已得到很重要应用。

硅与铍、铋、钴、金、铅、银、锡及锌的合金已经过研究、制造和报导。在这些二元系中没有出现化合物。同样也已制造出硅—铝合金。金属铁可用硅来进行涂复或合金化。富硅铁 (15% Si) 铸件是耐蚀的，只是不能进行机器加工。硅以硅—铁合金应用于钢铁工业，超共晶硅合金 (含硅量达 16% Si) 已有可能代替铸铁应用于摩托车制造工程。还见到有报导关于含有 Ni、Mo、Cr 和 V 的硅锰钢。

密致的硅由于表面有  $\text{SiO}_2$  保护层，因此温度到  $900^\circ\text{C}$  时，它还不致氧化。这种性能使硅接近于耐热合金组，如果不考虑其低塑性的话。本来工业纯硅是一种最丰富和最便宜的元素，加上质轻、耐蚀和耐热，但目前在结构材料上所以没有获得广泛应用，正是由于硅从室温到  $600^\circ\text{C}$  ( $1112^\circ\text{F}$ ) 以上的温度范围内的延性差的缘故。

根据反应式我们知道对于析出纯金属或硅化物来说，硅粉末是一种很好的还原剂：





## 2. 高纯度硅的用途

高纯度硅主要以单晶形式用于制造整流器、二极管、晶体管、光电池、太阳能电池、原子能电池、红外线探测器以及电子致冷等半导体器件。这些器件在近代化工业及先进科学技术部门中得到很重要的应用。

### (1) 整流器

半导体硅可用于制造电力用整流器（用于电气机车、电气化学工业、金属工业、船舶及车辆等的直流电源）和小容量的整流器（电视的接收器、音响装置、通信机以及代替其它以前用硒整流器和真空管的电子机器的整流电源）。将来高纯度硅在这方面的用途很大，很可能仅以少量的单晶硅就能达到很大的电力整流。整流器的逆耐压与硅本身的电阻率成正比例，所以采用纯度很高的硅比较有利。表2是西德西门子公司用极高纯度的硅制造的整流器，并与以往的各种半导体整流器的性能作比较。

表 2 各种半导体整流器的比较

	Cu <sub>2</sub> O	Se	Ge	Si	CuS
电流容量 (安培/厘米 <sup>2</sup> ) (允许电流密度)					
自然冷却	0.04	0.07	40	80—100	3.5
人工冷却 (强制)	0.14	0.20	100	200—300	3
耐反向电压 (有效值) 伏特	6—10	18—25	110	380	
最高使用 (工作) 温度 (°C)	60	75	65—70	150—250	190
整流效率 (%)	78	92	98.5	99.6	
所需容积比 (对同等输出功率)	30	15	3	1	
顺向初期电压降 (伏特)	0.2	0.6	0.5 (0.2—0.7)	0.7 (0.7—1.5)	
顺向 $\Delta V/\Delta L$ (欧姆·厘米 <sup>2</sup> )	2	1.1	$4 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	
反向漏泄电流	最大	较大	不大	最小	
开始工业应用时间 (年份)	1926	1930	1948	1953	