



半 导 体 工 艺 学

A. B. 桑杜洛娃 著

虞丽生等 译

郭长志 校

高 等 教 育 出 版 社

本書是根据苏联專家桑杜洛娃 (А. В. Сандулова) 的教授前在北京大學講授“半導體工藝學” (технология полупроводников) 時所用的講稿以及專家最近由蘇聯寄來的補充材料翻譯整理而成。內容詳盡而具體地介紹了蘇聯關於計多種半導體器件：氧化亞銅及硒整流器，鎢、硅二極管及整流器，熱敏電阻；非線性電阻；光敏電阻及硒光電池；半導體輻射熱計，非線性銻電元件及銻氧體心的製造工藝過程。可作為綜合大學或工科學校半導體專門化的參考書，也可供半導體技術工作者參考。

本書所根據的俄文原稿主要系由北京大學虞麗生同志譯出，此外，北京大學郭長志、李克誠、莫覺、李超榮等同志以及北京大學物理系三年級熱敏小組的幾位同學也參加一部分翻譯整理與校閱工作主要是郭長志同志做的，在整理工作的過程中，黃昆先生和袁永望先生提出許多寶貴的意見。

半 導 體 工 藝 學

A. В. 桑杜洛娃著

虞麗生等譯

高等教育出版社 出版北京宣武門內大街27號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第051號)

中華書局印刷 新華書店發行

統一書號15010·76 開本851×1168¹/₃₂ 印張8¹/₁₆ 插頁1

字數213,000 印數00001—11,000 定價(7)¥1.50

1959年6月第1版 1959年6月北京第1次

目 录

譯序.....	ix
第一章 引論	1
§ 1. 半导体在技术上的应用	4
§ 1-1 半导体在无綫电技术中的应用	4
§ 1-2 半导体在电工学上的应用——半导体功率整流器	6
§ 1-3 自动化装置中的半导体	7
§ 1-4 半导体在动力方面的应用	11
§ 1-5 特殊半导体材料的应用	12
第二章 氧化亞銅整流器	15
§ 2. 对原始銅的要求	16
§ 3. 氧化亞銅整流元件(整流片)的制造工艺	20
§ 3-1 銅片的清潔	20
§ 3-2 氧化和退火	21
§ 3-3 电极的安装	28
§ 4. 氧化亞銅整流器的人工老化	29
§ 5. 氧化亞銅整流器的結構和参数	34
§ 5-1 氧化亞銅整流器的結構	34
§ 5-2 氧化亞銅整流器的参数	37
§ 6. 整流器綫路	38
§ 7. 氧化亞銅單晶的获得	42
§ 7-1 原始銅的性質对氧化亞銅晶粒大小的影响	42
§ 7-2 制备氧化亞銅單晶的方法	44
文献	45
第三章 硒整流器	47
§ 8. 硒材料的工艺	47
§ 8-1 硒的性質	47
§ 8-2 硒的来源及其提取	48
§ 8-3 外类雜質的影响	51
§ 8-4 硒的提純与卤化	51
§ 9. 硒整流元件(整流片)的制造工艺	53

§ 9-1 制造硒整流片的基本工序	53
§ 9-2 制造硒整流片的其他工艺方法	67
§ 10. 硒整流器的结构和安装	69
§ 11. 硒整流器的电容	70
§ 12. 硒整流器的老化	71
文献	74
第四章 锗硅二极管	75
§ 13. 锗的提取及提纯	75
§ 13-1 锗的提取	75
§ 13-2 锗的化学提纯	77
§ 13-3 锗的物理提纯——区域熔化提纯法	77
§ 14. 从熔体中拉单晶	80
§ 15. 沿长度方向杂质均匀分布的锗单晶的获得	82
§ 16. 制造 $p-n$ 结的方法	85
§ 16-1 由熔体拉单晶时掺杂法	85
§ 16-2 改变拉晶速度法	85
§ 16-3 扩散法	86
§ 16-4 合金法	87
§ 17. 面接型锗二极管的制造工艺	88
§ 17-1 制晶片支架	89
§ 17-2 制外壳	89
§ 17-3 制接头(边缘上的)	89
§ 17-4 制管坯的引线	90
§ 17-5 玻璃绝缘物的加工	90
§ 17-6 锡垫片的压制	90
§ 17-7 制备铜粒	90
§ 17-8 晶片的制备	90
§ 17-9 制有引线的管坯	92
§ 17-10 装配二极管	94
§ 17-11 检验二极管	95
§ 18. $p-n$ 结的性质和伏安特性	95
§ 19. 硅二极管	99
§ 20. 锗硅大功率二极管(功率整流器)	101
文献	103
第五章 热敏电阻	104
§ 21. 热敏电阻的基本特性	104
§ 22. 热敏电阻的伏安特性	109

§ 23. 热敏电阻的制造工艺中的一般问题	115
§ 23-1 半导体材料的制备	117
§ 23-2 半导体材料的压榨	117
§ 23-3 热处理	117
§ 23-4 加电极	118
§ 23-5 热敏电阻的老化	119
§ 24. 各种材料的热敏电阻的制造工艺	120
§ 24-1 氧化钽热敏电阻	120
§ 24-2 氧化铜热敏电阻	123
§ 24-3 氧化铜和氧化锰的混合物热敏电阻	124
§ 24-4 CuO-MnO-O_2 系和 CoO-MnO-O_2 系热敏电阻	128
§ 24-5 氧化钛和氧化镁的混合物热敏电阻	134
§ 24-6 锰、钛、钒和钴的氧化物热敏电阻	135
§ 24-7 氧化亚铜和其他金属氧化物的混合物热敏电阻	136
1. $\text{PbO-Cu}_2\text{O}$ 系 2. $\text{MgO-Cu}_2\text{O}$ 系 3. $\text{CaO-Cu}_2\text{O}$ 系	
4. $\text{ZnO-Cu}_2\text{O}$ 系 5. $\text{MnO}_2\text{-Cu}_2\text{O}$ 系 6. $\text{Ni}_2\text{O}_3\text{-Cu}_2\text{O}$ 系	
§ 25. 热敏电阻的工业类型及其适用范围	147
§ 25-1 稳压器热敏电阻	149
§ 25-2 温度计热敏电阻	150
§ 25-3 测量型热敏电阻	154
§ 25-4 热补偿器热敏电阻	155
§ 25-5 用做热控制的热敏电阻	158
§ 25-6 间接加热热敏电阻	160
§ 26. 热敏电阻的某些应用	163
§ 26-1 热敏电阻在测温线路中的应用	164
§ 26-2 热敏电阻用作很准确的温度控制器	164
§ 26-3 测量型热敏电阻在无线电技术中测量超高频功率	165
§ 26-4 用热敏电阻测量真空度	165
文献	166

第六章 非线性电阻 168

§ 27. 非线性电阻的基本特性	169
§ 27-1 伏安特性	169
§ 27-2 温度特性	170
§ 27-3 许可功率、许可电压和许可电流	171
§ 27-4 滞后现象	172
§ 27-5 稳定性	173
§ 27-6 静电电容	173

§ 28. 碳化硅的物理性質	174
§ 29. 非綫性电阻的制造工艺	176
§ 29-1 金剛砂-石墨电阻	177
§ 29-2 維利特固片	180
§ 29-3 分路非綫性电阻	180
§ 29-4 低压非綫性电阻	180
§ 29-5 不用碳化硅的非綫性电阻	181
1. 碳酸錳与鉛的各种氧化物的混合料非綫性电阻	
2. 碳酸鋇与鉛的各种氧化物的混合料非綫性电阻	
§ 30. 非綫性电阻的作用机构	186
§ 31. 非綫性电阻的应用	187
文献	190
第七章 光敏电阻	192
§ 32. 光敏电阻的特性	193
§ 32-1 暗电流、亮电流和光电流	193
§ 32-2 暗电阻、亮电阻和电阻相对改变	193
§ 32-3 伏安特性	193
§ 32-4 光照特性	194
§ 32-5 光譜灵敏度	194
§ 32-6 积分灵敏度与积分比灵敏度	195
§ 32-7 時間常数与頻率特性	195
§ 32-8 温度特性	196
§ 32-9 稳定性	196
§ 33. 硫化錫光敏电阻	197
§ 33-1 硫化錫單晶光敏电阻	197
§ 33-2 硫化錫多晶光敏电阻	204
§ 33-3 某些杂质对硫化錫多晶光电性質的影响	207
§ 33-4 硒化錫光敏电阻	210
§ 34. 硫化鉛光敏电阻	211
§ 34-1 硫化鉛光敏电阻的制造工艺	211
§ 34-2 硫化鉛光敏电阻的特性	212
§ 35. 硒光敏电阻	215
§ 36. 硫化鉍光敏电阻	215
文献	216
第八章 半导体輻射热計	218
§ 37. 半导体輻射热計的基本特性	218

§ 37-1 半导体辐射热計的工作綫路及其有效訊号的計算	219
§ 37-2 半导体辐射热計的灵敏度	222
§ 37-3 半导体辐射热計的消散系数	224
§ 37-4 半导体辐射热計的时间常数	226
§ 37-5 半导体辐射热計的噪音和極限灵敏度	229
§ 38. 半导体辐射热計的几个工艺問題	233
§ 38-1 材料的选择	233
§ 38-2 薄膜的制造	234
§ 38-3 灵敏元件的裝置	235
§ 38-4 薄膜表面的黑化	236
§ 38-5 电极的安装	239
§ 38-6 周圍介質的控制	240
§ 39. 各种材料的半导体辐射热計及其制造工艺	241
§ 39-1 氧化亞銅辐射热計	241
§ 39-2 錳、鈷、鎳的氧化物辐射热計	242
§ 39-3 半导体銻薄膜辐射热計	243
§ 39-4 惰性小的銻薄膜辐射热計	243
§ 39-5 錳、鈷的氧化物和錳、銅的氧化物辐射热計	244
§ 39-6 当前已經生产的半导体辐射热計和 其他有希望的半导体辐射热計的材料	245
§ 40. 半导体辐射热計的应用	246
文献	248
第九章 非綫性鉄电元件	251
§ 41. 鉄电体的性質	251
§ 42. 鉄电体的分类	252
§ 43. 鈦酸鋇單晶的生長	254
§ 43-1 生長鈦酸鋇單晶的三种基本方法	254
§ 43-2 鈦酸鋇單晶的性質	255
§ 44. 鉄电体电容器	256
§ 44-1 BK1 型“变电容”的特性	256
§ 44-2 BK-1 陶瓷材料的制造工艺	256
§ 44-3 BK1 型“变电容”的制造工艺	258
§ 45. 三元系陶瓷鉄电体的制造工艺	259
§ 45-1 第一工艺段落——分別制备組元材料	259
§ 45-2 第二工艺段落——由組元材料制造陶瓷鉄电体	260
文献	262

附录一	KMT-1 和 KMT-4 型和某些新型热敏电阻的 制造工艺	263
附录二	硒光电池的制造工艺	269
附录三	铁氧体心的制造工艺	271

第一章 引論

电机学上的許多問題，在三十年以前就已經用为数不多的几种材料一一解决了：傳遞电流用金屬（主要是銅），傳導磁用鐵，而用作絕緣体的是几种固态和液态电介質。

半导体材料不仅在电导的数值方面介乎金屬和絕緣体之間，而且它还有自己的特殊性質，这种性質在金屬和絕緣体中是观察不到或者是表現得很弱的。因为有这些性質，半导体就得到了广泛的应用，例如：交流电的整流作用、高頻振动的放大和發生、用于可見光和紅外輻射的光电池、光敏电阻和其他用于自动化及远程控制上的仪器、以及其他許多用途。某些性質在半导体中表現得比在金屬中显著得多，而技术进展的新方向就是以此作为基础的。金屬的电阻随溫度升高而升高大約是每度 0.4%，而半导体的电阻随溫度升高而降低是每度 3—6%，因而对于半导体溫度改变 300° 时电阻会改变几千倍到几百万倍。在近代技术中，可以利用半导体材料的这种性質来制造热敏电阻，热敏电阻可以用来控制和測量溫度，用来使电流以給定速度漸漸关断，用来稳定綫路的电压和电流。

在金屬中每度溫差的溫差电动势只有几微伏或几十微伏，而在半导体中要大几十倍以至几百倍。这种差别使得有可能用效率为 10% 数量級的半导体溫差电池代替效率仅为 0.5% 左右的金屬溫差电池，把热能直接轉变成电能。半导体溫差电池所产生的溫度差达到好几十度，因此它在冷却技术上可以得到广泛的应用。

直到最近时期，在电工学上唯一的磁性材料还是鉄及其合金，由于电导大使得它不能应用在高頻情況下，而高頻情况在近代技

术中却起着很大的作用。半导体鉄氧体(鉄淦氧磁体)把高磁性和大电阻結合起来了,并且在数量級为百万赫茲的高頻下仍然保持这些优点,因而現在鉄氧体得到了很大的实际应用。

鈦酸鋇型的半导体鉄电体的介电常数一直到高頻时还是几千單位,故可用来代替介电常数仅为几个單位的电介質。

半导体本身所具有的巨大可能性吸引了物理学家和技术人員的注意。半导体电子学的科学研究工作在理論上或者实验上都取得了大量的結果,同时,在半导体的实际利用方面也大大地进展了,特别是在最近十年来进展得更快。在这些年里,改善了旧有的半导体器件,还發明了新的半导体器件,并且大大的扩充了它們的应用范围。为了能看到一幅半导体在近代技术中应用的令人信服的景象,我們列举一些半导体在技术上的最重要的应用如下:

- 1) 交流电整流器(硒、氧化亞銅、硫化銅,近年来又有鍺和硅);
- 2) 用于无綫电器材、計算机和自动化元件上的檢波器和高頻振蕩轉換器(由鍺、硅和其他材料做成的器件);
- 3) 固体放大器(Транзистор)——晶体三極管,用以代替真空三極管;
- 4) 基于固体放大器的无綫电波發生器;
- 5) 由鉄氧体做成的无綫电零件、磁致伸縮超声波發生器及水中探测器;
- 6) 鉄电压电器件,計算机中的記憶元件;
- 7) 热敏电阻;
- 8) 稳压器与稳流器;
- 9) 傳遞綫的防护;
- 10) 用于测量和控制光,以及用于自动化上的光敏电阻和光电池;
- 11) 电视器件中的灵敏元件;

- 12) 紅外技术上的仪器;
- 13) 用于远程控制和自动化生产仪器中的轉換器和發射器;
- 14) 真空技术中的氧化阴極;
- 15) 用作电訊装置中及小能量的供电电源的溫差电發生器;
- 16) 致冷器和微恒溫器, 用于无綫电仪器中的恒溫及其他目的;
- 17) 把太阳輻射、放射性及其他射綫的輻射能量变成电能的光电池和溫差电轉換器;
- 18) 化学反应的触媒剂;
- 19) 發光材料。

半导体生产的規模和多样性一年年增長着。对化学成分の純度、对少量的外类雜質的灵敏性是半导体的典型性質。但是最近以前使用的仍然是講的原始材料。而在固体放大器方面所以能得到成就就是因为能获得雜質含量不超过 $10^{-6}\%$ 的純鏷。原始半导体材料的純度在制备半导体器件方面有决定性的意义。对于每一种生产用的材料能否合理選擇是决定于我們对半导体的物理性質和它的晶体化学結構之間关系的知識, 而这方面的知識我們掌握得还不够。为解决某一个技术問題而进行的半导体材料的選擇在大多数情况下是帶有偶然的性質的, 这因为对广大的半导体組类还缺乏系統的研究。

現在半导体理論能成功地解釋大量的实验現象, 但它并不能够預言某一定材料的性質。現存半导体理論的缺点限制了在上述所有的方面上成功地应用半导体。毫无疑問, 發展一个比較完善的理論会加速掌握半导体材料的性質, 会导致技术上的新成就。

理論的进一步發展会把半导体的性質和組成半导体的化学鍵的本質及填充原胞的电子云的結構相連系起来。这就使人們有可能預言給定的某化合物的性質, 有可能对某一定的技术問題合理

地選擇材料。

完全有必要大大地擴充關於雜質及其相互作用、關於結構缺陷和其規模、關於复合中心、附着、電荷散射的概念。

近代理論不僅應該包括半導體的電學性質，而且應該在其相互連系的形式下包括其熱學、光學和磁學性質。

至於半導體的實驗研究問題，則應該和最重要的技術應用以及能闡明基本理論問題的研究結合起來。

§ 1. 半導體在技術上的應用

現在我們來看看半導體在技術上應用的五個最重要的方面：

- 1) 在無線電中；
- 2) 在電工學中；
- 3) 在自動化裝置中；
- 4) 在動力方面；
- 5) 半導體材料的特殊應用(鐵氧體和鐵電體)。

§ 1.1 半導體在無線電中的應用 第一批半導體整流器是用氧化亞銅做的，接着很快就出現了硒整流器，而在蘇聯曾製成可通過很強電流的硫化銅整流器。儘管根據水銀蒸汽的放電做的整流器效率較高，但固體整流器很快地得到了廣泛的應用。硒和氧化亞銅做的固體整流器的功率損耗達到 20%，而別種電轉換器卻不超過百分之几，但是如果用其他材料做成 $p-n$ 結就能消除這個缺點。例如用鍺和硅做的整流器中，損耗不超過百分之几，而其尺寸卻大大地減小。最近幾年來，半導體二極管、半導體三極管在無線電、有線通訊和一系列其他技術範圍(計算機、遠程控制線路、自動化裝置)中都得到了愈來愈廣泛的應用，代替了真空管。

体积小、重量小、没有灯丝、效率高、可靠性大、服务时间长、对撞击和振动的坚固性大、起作用的准备时间短，这些都是在应用上半导体无綫电器件和电子管比较起来最重要的优点。半导体器件为解决某些用真空管实际上不能解决的问题打开了途径。

近代的锗半导体无綫电器件，一方面具有这些根本的优点，另一方面，也具有一些重要的缺点，因而暂时限制了用半导体器件广泛的代替真空管。这些缺点中最主要的有：温度、功率和频率方面工作范围小、温度依赖关系大、参数随时间不够稳定、噪音高。

目前在半导体器件的生产方面还存在着很大的困难，其中最主要的是制备的工艺过程的控制和重复性不好，因而生产出的质量较高的产品只占总量的一小部分。

苏联和其他国家最近几年来的研究结果表明：上面列举的器件的缺点和工艺上的困难，是和我们对半导体的知识的局限性有关的，也和科学技术研究的规模还不够广阔深入有关。

利用不同于锗的别的半导体材料（硅、碳化硅，以及复杂成分的半导体）可能会显著的增加工作温度的范围，在这方面，硅的应用已有很大的成就。改善半导体材料的均匀程度、结构、不希望和不必要的杂质的存在和分布等等，有可能消除工艺上的许多困难和器件的缺点。

提高半导体器件特性的稳定性与重复性问题，降低噪音问题是和半导体表面特征与在表面中所进行的电子过程的研究相联系的。改善半导体材料的质量、增加工艺学知识、进一步地发展和更近代化地利用半导体无綫电器件的工作原理，可以扩大半导体器件在高频（几千兆赫兹）和大功率方面的应用范围。

这样，为了扩大半导体无綫电器件的应用范围和改善其特性，必须在下列各方面进行广泛的科学研究：

- 1) 获得某些半导体材料（锗、硅、 $A^{III}B^V$ 化合物、碳化硅及其

他)在超高純度状态下的完整結構的單晶。

研究將少量化學雜質引入這些物質的單晶中去的方法，研究結構缺陷；

2) 研究少量化學雜質和結構缺陷對半導體單晶的電學性質和光學性質的影響，研究在尽可能寬的範圍中控制半導體電學性質的方法；

3) 研究由不同的外部干擾(電場、磁場、光、放射性輻射)所決定的半導體中非平衡電子過程。

研究電子和空穴復合過程的物理本質、以及各種雜質和結構缺陷對這些過程的影響；

4) 研究經過不同程度處理後的半導體表面狀態和靠近表面的電子過程的特點；

5) 尋找和研究與 $p-n$ 結方法不同的、能控制半導體中電子流的新原理。

§ 1.2 半導體在電工學上的應用——半導體功率整流器 半導體整流器已經解決了許多要求在電壓為 100—200 伏下有幾安培整流電流的問題。然而，因為功率損耗大(數量級為 20%)，每單位重量和體積所能給出的功率小，這樣就大大地限制了半導體整流器的應用。

鎢和硅整流器的出現增加了固體整流器的應用範圍。鎢整流器可以在 1000 伏下整流幾百安培的電流，鎢整流器的功率和硒與氧化亞銅的比較要超過大約 10000 倍。利用硅元素，使我們能得到在電壓為 1000—2000 伏下整流電流為幾百—幾千安培的整流器。

把鎢或硅的整流元件並聯起來可以製成整流電流達 10^5 安培的整流器。這種整流器就能很成功的代替水銀整流器和機械整流器，用於電解、蓄電池充電、各種無線電裝置中供直流電等目的，以

及用于电火车中。

关于功率整流器应该在如下各方面进行进一步的研究：

- 1) 获得在电学性质方面高度均匀的锗和硅；
- 2) 获得电阻率数量级为 1000 欧姆·厘米的高纯度硅；
- 3) 寻找新的杂质半导体材料，其禁带宽度要超过 1.2 电子伏特；
- 4) 为提高单个元件的参数稳定性和重复性，要改善整流元件生产的设计和工艺。

§ 1.3 自动化装置中的半导体 目前，作为自动化装置中的元件的半导体电子学器件已经得到各种各样的重要应用。每一个自动化装置都是由几个各自有一定功用的元件组成的。半导体器件主要是作为第一级接收元件，即用作在操纵过程中把一个参数的改变和另外一个参数的改变用函数连系起来的元件，因而，有十分重要的作用。半导体器件在用作自动化装置中的中间转换元件方面的意义也是很大的。这里所说的半导体器件应该包括各种放大器、非线性稳定器和转换器。以下分别讨论自动化装置中的各种半导体器件。

1. 热敏电阻

近来，用具有高负电阻温度系数的半导体做成的所谓热敏电阻 (Термистр 或 Термочувствительное Сопротивление) 得到了广泛的应用。这种半导体是氧化物、硫化物、氮化物、金属碳化物和金属氮化物。制备热敏电阻最常用的方法是压榨和焙烧磨细了的半导体粉末与加进去的粘连物质的混和物。热敏电阻的电阻温度系数是负的，并且很大，达到 3—6%；而金属的电阻温度系数是正的，其数值约为 0.4%。热敏电阻是非线性电阻，并在某些条件下又具有负微分电阻的性质，这就大大地扩大了热敏电阻的应用范围。

利用热敏电阻可以很成功地解决下述问题：

1) 在非常不同的条件下以很大的精确性测量和控制各种各样研究对象的温度。十分之几毫米大小的微热敏电阻可测量树叶、动物皮肤及其他热容量很小的研究对象的温度；

2) 补偿各种仪器中金属元件的电阻随温度之改变；

3) 测量和控制辐射流；

4) 在直流线路和交流线路(频率可达 10^{10} 周/秒)中控制和测量功率；

5) 稳定电压；

6) 测量液流和气流的速度；

7) 测量真空度。

但是,热敏电阻也存在着许多缺点,这些缺点阻碍了热敏电阻在自动学和遥控学中得到更广泛的应用。热敏电阻的缺点是:

1) 参数对时间的稳定性不够；

2) 当加热超过 $150-200^{\circ}\text{C}$ 时其成分很快的改变；

3) 化学稳定性小,以致于不得不将它放在保护壳中,这就增加了热敏电阻的热惰性。

在热敏电阻方面,进一步的工作应该是寻找具有高电阻温度系数和更加稳定的半导体材料。然而,以前几乎没有从这方面来研究过金属化合物,为了要做出很可靠的、主要是稳定的、各种技术和科学仪器中的测量和记录元件,必须做很多的工作。

2. 半导体温差电偶

半导体温差电偶应该在自动学上得到广泛的应用,这种温差电偶的温差电动势比金属的大许多倍,并且有显著的优点,然而,这些直到现在还未被充分利用。半导体温差电偶的缺点是内电阻较大、机械强度小、化学易变性以及须要用金属接触。

3. 半导体非线性电阻

目前,能把一些电学参数(电压、电流、频率)的改变直接转变

成另一些电学参数(一般是电阻、电压和电流)的改变的电学元件得到了广泛的应用。半导体使我们能得到伏安特性曲线与直线相差得很远的电阻。例如金钢砂粉、粘土和石墨的混合物所做成的电阻就是这种非线性电阻。

有一种半导体,当电流通过它时大量发热,因而电阻就改变,这就是另外一种非线性电阻。上面所述的热敏电阻就是属于这一种的。

“变电阻”(Варистор)型的半导体非线性电阻可以解决许多技术上的问题,并且已成功地应用在技术上。目前生产的这种电阻可用于电压为250—150000伏的情况下,变电阻同样也可成功地应用在低电压线路和弱电流线路中。变电阻可用做:

1) 在含有感应物(磁启动机、马达绕组、磁起重机的工作线圈等等)的线路中,当电路突然断开时,可预防电压过荷;

2) 不仅在电压有改变时可起防护作用,而且对在高内阻电源的负载改变时已经产生的电压过高也有防护作用,例如在无线电和电视接收机中;

3) 调节电话线路中的电压。

目前实际上只用了金钢砂来制造变电阻型的半导体非线性电阻。必须大力开展寻找制造变电阻的新的半导体材料的工作,还必须研究它的制造工艺。

4. 光电器件

当半导体吸收了电磁辐射以后,就可观察到附加载流子的出现,表现为样品电阻的减少,并在一定条件下出现光电势。在半导体光电器件(光敏电阻、半导体光电池)中利用了这两个现象。这些器件可以用做:

1) 观察、记录和测量电磁射线,无论是可见的(光)或不可见的(红外线、紫外线、X射线、γ射线);