

В. В. 帕塞科夫 Г. А. 薩維利也夫

Л. К. 契尔金 著

非线性半导体电阻 及其应用

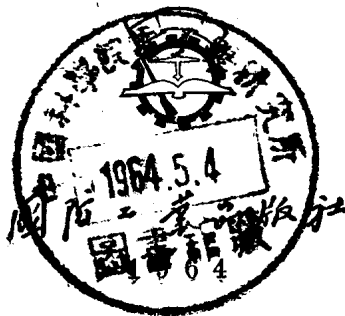
国防工业出版社

7

73.67
137
21

非綫性半导体电阻 及其应用

B. B. 帕塞科夫 I. A. 薩維利也夫
J. K. 契尔金 著
高 煜 譯



104238

83/01

內容簡介

本书闡明苏联和其他国家以碳化硅为基本材料制造的非綫性半导体电阻(压敏电阻)的主要数据。

书中給出了原材料的特性, 简要介紹了生产非綫性半导体电阻的工艺过程, 非綫性半导体电阻的工业型式和实验型式, 以及非綫性半导体电阻的电气特性与电場强度、温度和运用时间等的关系。

书中还討論了非綫性半导体电阻在接触器的火花熄灭电路、温度补偿稳压器、数值連乘及再现各种函数(其中包括三角数)的解算装置以及在自动調节装置中的应用。

书中以曲线、表格、电路和結構图的形式, 給出了有关非綫性半导体电阻特性和应用的实际数据。

本书可供自动装置、通信技术、計算技术、仪表制造、电视和电子学領域內涉及零件制造的工程技术工作者和研究人員之用, 也可作为电工技术高等院校相应专业的教学参考书。

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В. В. Пасынков

Г. А. Савельев Л. К. Черкин

СУДПРОМГИЗ 1962

*

非綫性半导体电阻及其应用

高 焜 譯

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

850×1168 1/32 印張 6 13/16 174 千字

1964年2月第一版 1964年2月第一次印刷 印数: 0,001—5,350册

統一书号: 15034·722 定价: (科六)1.00元

目 录

导 论	4
第一章 非线性半导体电阻	7
§ 1. 非线性半导体电阻的一般知识	7
§ 2. 非线性半导体电阻的主要特性	9
§ 3. 制造非线性半导体电阻的材料	19
§ 4. 非线性半导体电阻的生产工艺	32
§ 5. 以碳化硅为基本材料的非线性半导体电阻的作用机制	43
§ 6. 非线性半导体电阻的结构形式、类型和特性	55
§ 7. 非线性半导体电阻的测试设备和测试方法	90
第二章 非线性半导体电阻的应用	102
§ 8. 非线性半导体电阻使用可能性的一般根据	102
§ 9. 保护设备和火花熄灭设备	105
§ 10. 稳压器	115
§ 11. 可控线路	139
§ 12. 变频器	149
§ 13. 非线性四端网络	162
§ 14. 函数装置	171
§ 15. 非线性半导体电阻的各种应用	195
附录	206
参考文献	214



104238

73.67
137
21

非綫性半导体电阻 及其应用

B. B. 帕塞科夫 I. A. 薩維利也夫
J. K. 契尔金 著
高 煜 譯



104238

83/01

內容簡介

本书闡明苏联和其他国家以碳化硅为基本材料制造的非綫性半导体电阻(压敏电阻)的主要数据。

书中給出了原材料的特性, 简要介紹了生产非綫性半导体电阻的工艺过程, 非綫性半导体电阻的工业型式和实验型式, 以及非綫性半导体电阻的电气特性与电場强度、温度和运用时间等的关系。

书中还討論了非綫性半导体电阻在接触器的火花熄灭电路、温度补偿稳压器、数值連乘及再现各种函数(其中包括三角数)的解算装置以及在自动調节装置中的应用。

书中以曲綫、表格、电路和結構图的形式, 給出了有关非綫性半导体电阻特性和应用的实际数据。

本书可供自动装置、通信技术、計算技术、仪表制造、电视和电子学領域內涉及零件制造的工程技术工作者和研究人員之用, 也可作为电工技术高等院校相应专业的教学参考书。

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В. В. Пасынков

Г. А. Савельев Л. К. Черкин

СУДПРОМГИЗ 1962

*

非綫性半导体电阻及其应用

高 焜 譯

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

850×1168 1/32 印張 6 13/16 174 千字

1964年2月第一版 1964年2月第一次印刷 印数: 0,001—5,350册

統一书号: 15034·722 定价: (科六)1.00元

目 录

导 论	4
第一章 非线性半导体电阻	7
§ 1. 非线性半导体电阻的一般知识	7
§ 2. 非线性半导体电阻的主要特性	9
§ 3. 制造非线性半导体电阻的材料	19
§ 4. 非线性半导体电阻的生产工艺	32
§ 5. 以碳化硅为基本材料的非线性半导体电阻的作用机制	43
§ 6. 非线性半导体电阻的结构形式、类型和特性	55
§ 7. 非线性半导体电阻的测试设备和测试方法	90
第二章 非线性半导体电阻的应用	102
§ 8. 非线性半导体电阻使用可能性的一般根据	102
§ 9. 保护设备和火花熄灭设备	105
§ 10. 稳压器	115
§ 11. 可控线路	139
§ 12. 变频器	149
§ 13. 非线性四端网络	162
§ 14. 函数装置	171
§ 15. 非线性半导体电阻的各种应用	195
附录	206
参考文献	214



104238

导 論

最近十年来，科学和技术发展的特征是越来越深入地研究和利用材料的性质，并以此为基础研制出结构简单，外形微小和工作可靠的装置。

电导系数值处在金属导体和介质的电导系数数值之间的一大类物质就是半导体。

在 20°C 的温度下，金属导体的电阻系数在 $10^{-6}\sim 10^{-8}$ 欧姆·厘米的范围内，即包括大约三个数量级；实际（技术上的）介质的电阻系数处于 $10^9\sim 10^{19}$ 欧姆·厘米的范围内，即不小于 10 个数量级。电阻系数数值处于 $10^{-4}\sim 10^{10}$ 欧姆·厘米的很宽的中間范围（即可达 14 个数量级），部分超越导体和介质的范围，均属于电子导电性的半导体物质。

半导体的电导率在很大程度上取决于外部能量的作用，也取决于不同的杂质，即使加在主半导体内的杂质的数量有时是极其微量的。

当将金属的电流导体加热时，它的电阻增大；与此相反，当半导体加热时，它的电阻通常会降低。因此，在接近于绝对零度的温度下，金属具有很高的导电性（有许多种金属变成为超导金属）；在这些条件下，純的电子半导体的电阻变得很大而接近于介质。

半导体的电导率不但可用热控制，还可用光和放射性辐射控制。半导体的电导率在强电场作用下增高，而在磁场内减弱。

半导体性能的可控性奠定了热敏电阻（热变电阻）、光敏电阻和非线性半导体电阻（压敏电阻）等作用原理的基础。

半导体可用两种电导率来表征：电子导电(n)和空穴导电(p)^①。

当半导体中存在 p - n 結时，就产生阻挡层，它对交流具有整流效应。有了两个和两个以上的相互关联的結便能得到可控系統。

半导体在电子学和无綫电工程中的最重要应用是基于 p - n 結的运用可能性。各种型式的大功率整流器和小功率整流器、高频檢波器、以及晶体管均是半导体在电子学和无綫电工程中应用的例子。

最后，还要指出，半导体器件可有成效地用来把各种形式的能量变换为电流的能量，其变换效率的大小可与现有其他型式的变换器的效率相比拟，有时，甚至还超过它們。效率为 8% 左右的热电池和效率为 11% 左右的“太阳电池”就可以作为半导体变换器的实例。

利用半导体可在非常大的容积內，使溫度变化几十度。

此外，利用半导体还可以解决許多各式各样的电工技术問題，例如，它們可用作加热元件(硅合金棒)，可用来激发引燃管整流器的阴极輝点(作为引燃管引燃器)、吸收波导中的小功率和大功率(作为波导吸收器)和測量磁場强度(充当霍耳傳感器)，还可以作为压力傳感器和化学反应催化剂等等。

实际应用的半导体材料可以分成下列四类：

1. 半导体元素；
2. 半导体化合物和合金；
3. 半导体絡合物(陶瓷半导体)；
4. 玻璃状半导体和液体半导体。

已經知道的半导体元素約有 10 种，它們是：鍺，硅，硒，碲，砷，磷和硼等。

① n —英文 negative 的字首，表示負的意思； p —英文 positive 的字首，表示正的意思。

最著名的半导体化合物是氧化物, 硫化物, 硒化物, 碲化物, 碳化物和 A^mB^n 化合物(如 InSb) 等等。还有某些金属合金也属于半导体。

用陶瓷粘合剂粘合起来的由碳化硅、碳化硼或碳构成的具有导电相的材料属于陶瓷半导体。

在苏联, 半导体的研究和应用可分为三个主要时间:

第一个时期——个别发现和研究的时期(1930年以前);

第二个时期——创立半导体科学以及应用半导体整流器与光电管技术的时期(1930—1950年);

第三个时期——广泛应用半导体的时期(从1950年起)。

半导体器件具有许多优点。这些优点是:

1. 寿命很长(在电子导电性时, 材料不会老化);
2. 外形小, 重量轻;
3. 结构简单和可靠, 机械强度很高(不怕振动和冲击);
4. 电子管的半导体代用品没有灯丝电路, 消耗不大的功率, 并且有很小的惯性;
5. 大量生产时非常经济。

使用非线性半导体电阻(HIC 或压敏电阻)是半导体技术中的新方向之一。它们在简单、小型而廉价的电子设备和测量仪器的制造中提供了许多新的可能性。利用这些电阻可以解决自动学和解算技术中的许多迫切问题。这种潜力目前还利用得不够。

本书将阐明非线性半导体电阻的电子物理性能, 生产工艺, 以及它们在火花熄灭, 保护, 稳压, 控制, 变频, 再现函数关系和其他目的上的应用。

第一章 非綫性半导体电阻

§ 1. 非綫性半导体电阻的一般知識

当电阻溫度在宏观上不变时，其伏安特性曲綫不是直綫的电阻，称为非綫性半导体电阻(НПС)或压敏电阻。在极性变化的直流电压或在交变电压下，可画出这种伏安特性曲綫，其中之一如图1所示。由图可以看出，在直流电压或某一頻率的交变电压下，这种电阻是一个有效电阻。

应将电場强度增大时阻值会减小的非綫性半导体电阻与在加热影响下阻值会改变的热敏电阻或热变电阻加以区别。按照工作原理，热敏电阻具有慣性，而非綫性半导体电阻实际上是没有慣性的。

非綫性半导体电阻可以有两种形式：对称非綫性半导体电阻和不对称非綫性半导体电阻。当外加电压的极性改变时，具有相同伏安特性曲綫分支(图1)的电阻属于对称非綫性半导体电阻。当相同数值的电压加在不同方向上时，电流有不同数值的电阻属于不对称非綫性半导体电阻。

目前，不論在苏联还是在其他国家，实际上只采用以碳化硅为基

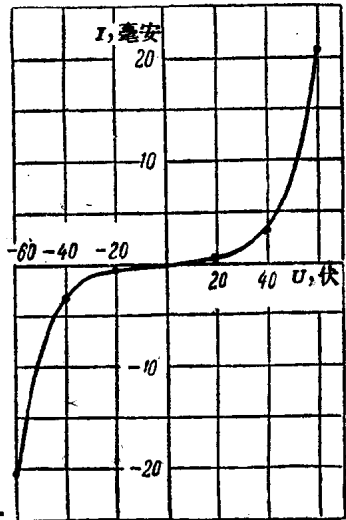


图1. 非綫性半导体电阻的典型伏安特性曲綫。

本材料的非綫性半导体电阻作为对称非綫性半导体电阻；各种形式的半导体整流器和檢波器均是不对称非綫性半导体电阻。

根据非綫性半导体电阻与金属电路接触的类型不同，可分为具有两个金属电极的面接触式非綫性半导体电阻，和具有一个或两个电极的点接触式非綫性半导体电阻。

点接触电极的非綫性半导体电阻，具有較小的固有电容，通常，当电阻在高频工作时，固有电容就会显现出来。

流过的电流与电压具有非綫性关系的首批材料是美国 GE 公司的泰利(Тайрит)和德国 AEG 公司的奥采里(Оцелит)，可用于电气设备的防雷保护装置、仪器和高压傳輸綫的絕緣[74, 75, 76]。

在苏联有許多机构在研究和制造高压閘避雷器用的非綫性半导体电阻[3, 21, 27, 43]。

各类泰利(Тайрит)或季利特(Тирит)、維里特(Вилит)和捷維特(Тервит)[43, 46, 55]都是目前苏联工业已研究和掌握，并付诸应用的非綫性半导体电阻。

这些非綫性半导体电阻的特性，在技术文献中，沒有单独列出，因为它们是包括在自动閘避雷器組件中的。对工业出产的避雷器来说，在苏联已有全苏标准 ГОСТ8934—58。这种标准的主要内容列在附录中。

从 1948 年起，列宁格勒 В. И. 烏里揚諾夫(列宁)电工学院就开始研究半导体材料的非綫性性质，并研制出各类低压非綫性半导体电阻[5~7, 11, 17, 34, 36~41, 49, 56, 57]。从 1958 年起，塔林城的 X. 別盖尔曼(Пегельман)无线电工厂开始生产低压非綫性半导体电阻的工业产品。

此外，全苏列宁电工研究所，国立电工陶瓷研究所，基輔工业学院，以及其他科学研究机关和生产組織均在从事非綫性半导体电阻的研究，并研制出一批实验的低压非綫性半导体电阻。

在許多国家的技术界中，低压非綫性半导体电阻得到了广泛

的应用; 中华人民共和国, 德意志民主共和国, 捷克斯洛伐克社会主义共和国, 美国, 瑞典, 德意志联邦共和国和其他国家均在生产此类电阻。

§ 2. 非线性半导体电阻的主要特性

非线性半导体电阻的特性, 可用给定外加电压 U 作用下的电导率 σ_c 或静态电阻 R_c 来表征, 也可以用在同样电压下的微分电导率 σ_n 或动态电阻 R_n 来表征。

根据上述,

$$\sigma_c = \frac{I}{U} \text{ 或 } R_c = \frac{U}{I} \tag{1}$$

而

$$\sigma_n = \frac{dI}{dU} \text{ 或 } R_n = \frac{dU}{dI} \tag{2}$$

根据伏安特性曲线在该点切线的斜率 (图 2), 考虑到坐标轴的比例尺, 可以求出微分电导率。

我们把比值

$$\beta = \frac{\sigma_n}{\sigma_c} = \frac{R_c}{R_n} = \frac{dI}{dU} \cdot \frac{U}{I} \tag{3}$$

称为非线性半导体电阻的非线性系数。

容易看出, 对于具有任何线性特性曲线的电阻来说, 这一比值等于 1, 而对非线性伏安特性曲线来说, 此比值便不等于 1。

如果电阻的伏安特性曲线符合方程式

$$I = BU^\beta, \tag{4}$$

则非线性系数将为一常数。可以反证如下:

$$\beta = \frac{dI}{dU} \cdot \frac{U}{I} = \text{常数},$$

$$\int \frac{dI}{I} = \beta \int \frac{dU}{U},$$

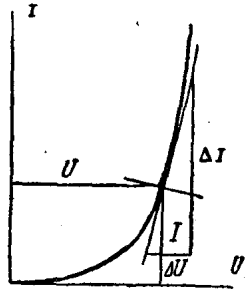


图 2. 非线性半导体电阻电导率定义的说明图。

$$\ln I = \beta \ln U + \ln B,$$

$$I = BU^\beta.$$

图3所示为遵守方程(4)的非线性半导体电阻的伏安特性曲线族,但具有不同的非线性系数值, β 的数值从1到10。为了能将电阻互相进行严格的比较,取系数 B 等于1。

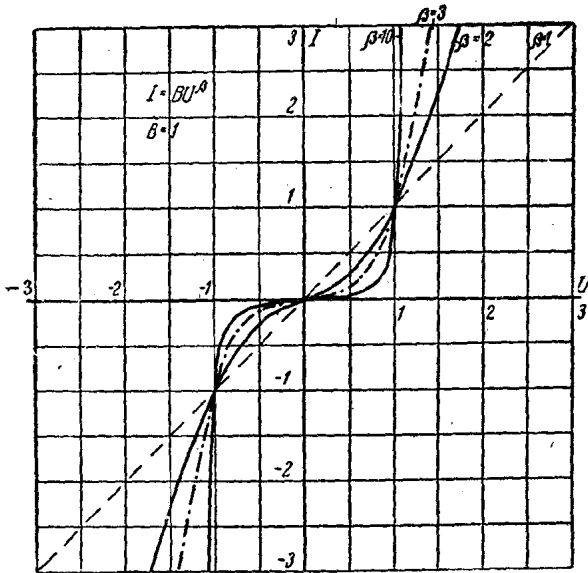


图3. 遵守方程 $I = BU^\beta$ 且具有不同 β 值的非线性半导体电阻的理论伏安特性曲线。

在苏联和其他国家的文献[5, 15, 20, 22, 36~46, 50, 59~62, 78, 84~87等]中,各种以碳化硅为基本材料制成的非线性半导体电阻的伏安特性曲线,常用方程(4)或方程

$$U = AI^\alpha \quad (5)$$

来近似表示,式中 A, B, α, β 均是常数,而 $\beta = \frac{1}{\alpha}$, $B = A^{-\frac{1}{\alpha}} = A^{-\beta}$ 。

必须预先说明,这些方程中的任何一个,只适用于很窄的电压或电流范围。

非线性系数 β 和非线性指数 α 可用下面的公式求出:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{\log \frac{I_2}{I_1}}{\log \frac{U_2}{U_1}} = \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log U_2 - \log U_1}, \\ \alpha &= \frac{\log \frac{U_2}{U_1}}{\log \frac{I_2}{I_1}} = \frac{\log U_2 - \log U_1}{\log I_2 - \log I_1}, \end{aligned} \right\} (6)$$

式中 I_1, I_2, U_1, U_2 ——分别是在选定的很窄数值范围内的电流和电压值。

碳化硅粉末的真正电气特性曲线[5, 11, 27, 37, 46等], 和由它们制成的小功率非线性半导体电阻的特性曲线, 在相当宽的电压和电流范围内, 与上述方程不同; 非线性系数 β 和非线性指数 α 是电压的函数, 而且是逐点改变的, 当在曲线的不同部分上进行计算时, 常数 A 和 B 也是不同的。这在估计非线性半导体电阻的质量和将它们彼此进行比较时, 就会遇到相当大的困难。

当应用方程(5)时, 非线性半导体电阻的平均场强 E 和平均电流密度 j 之间的联系, 可用下式表示:

$$E = A_1 j^\alpha, \quad (7)$$

式中 A_1 ——取决于材料的量, 在数值上等于尺寸为 $1 \times 1 \times 1$ 厘米³ 的样品上有 1 安电流流过时的电压。

公式(5)中的 A 与公式(7)中的 A_1 可用下式联系起来:

$$A = A_1 \frac{h}{S^\alpha}, \quad (8)$$

式中 h ——电阻电极间的距离, 即厚度(厘米);

S ——电阻横截面的面积(厘米²)。

同理, 当使用方程(4)时, 也可以得到不同厚度和不同截面积的非线性半导体电阻的特性曲线之间的关系。

表示式(7)和(8)只适用于由均匀材料制成的电阻, 在实际运用时, 由于所压制电阻性能的不均匀性, 这两个表示式就可能不成

立。

在表 1 中, 根据方程(4)和(5), 分类整理了非线性半导体电阻参量之间的关系。

表 1 非线性半导体电阻参量之间的联系

$U = AI^\alpha$		$I = BU^\beta$	
$\alpha = \frac{1}{\beta}$	$A = \frac{1}{B^\alpha} = B^{-\frac{1}{\beta}}$	$\beta = \frac{1}{\alpha}$	$B = \frac{1}{A^\beta} = A^{-\frac{1}{\alpha}}$
$E = A_1 j^\alpha$		$j = B_1 E^\beta$	
$A = A_1 \frac{h}{S^\alpha}$	$\alpha = \frac{\log \frac{A_1 h}{A}}{\log S}$	$A_1 = \frac{1}{B_1^\alpha}$	$B = B_1 \frac{S}{h^\beta}$
			$\beta = \frac{\log \frac{B_1 S}{B}}{\log h}$
			$B_1 = \frac{1}{A_1^\beta}$
$R = \frac{U}{I}$			
$R = AI^{\alpha-1}$		$R = \frac{1}{B} U^{1-\beta}$	
$P = IU$			
$P = AI^{\alpha+1}$		$P = BU^{\beta+1}$	
n 个相同的非线性半导体电阻的串联			
$U_n = nU = A_n I^\alpha$	$A_n = nA$	$I = B_n (nU)^\beta$	$B_n = \frac{B}{n^\beta}$
m 个相同的非线性半导体电阻的并联			
$U = A_m (mI)^\alpha$	$A_m = \frac{A}{m^\alpha}$	$I_m = mI = B_m U^\beta$	$B_m = mB$

在参考文献[27, 46 和 50 等]中指出, 粉末非线性半导体电阻的特性曲线, 最好用指数方程来近似表示。在参考文献[5]中, 给出碳化硅粉末的电导系数的对数与电阻上场强度的平方根之间的关系(图 4)。由图可以看出, 这是一条直线。

列宁格勒电工研究所进行的一系列科学研究成果指出, 对于

由不同粘合剂燒結的低压碳化硅电阻來說，在足够寬的电压值范圍內，可以用下列形式的指数方程来表示：

$$\left. \begin{aligned} I &= \sigma_0 e^{b\sqrt{U}}; \\ \sigma &= \sigma_0 e^{b\sqrt{U}}; \\ I &= \sigma U, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 σ ——随电压而变化的电阻的电导率；

σ_0 ——弱电場內的电导率；

b ——表征电阻特性的非綫性常数(伏 $^{-\frac{1}{2}}$)。

γ , 欧姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$

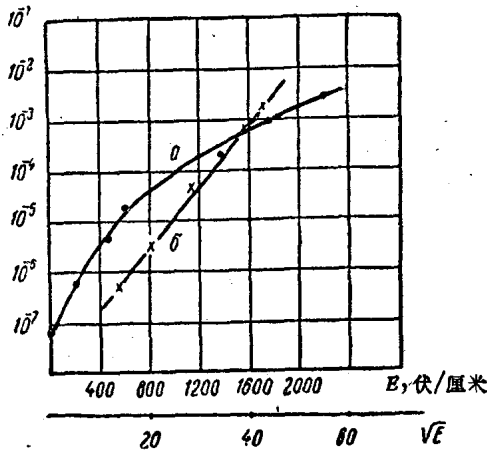


图 4. 碳化硅粉末的电导系数与电場强度
(a)和与 \sqrt{E} (b)的关系。

如果使 $b=0$ ，即考虑电导率与外加电压无关的电阻，那末从这个更普遍的非綫性半导体电阻伏安特性曲线方程中，就可以导出欧姆定律这种个别情况。

当使用方程(4)近似表示非綫性半导体电阻的伏安特性曲线时，从方程(3)，(4)和(9)可以得到非綫性系数 β 和常数 B 的数值：

$$\beta = 1 + \frac{b\sqrt{U}}{2}, \quad (10)$$