

半导体整流电路

苏联 B. Ю. 罗金斯基著

王怀亮译

人民邮电出版社

半 導 体 整 流 电 路

苏联 B.И. 罗金斯基 著

王 怀 亮 译

人 民 邮 电 出 版 社

В.Ю. РОГИНСКИЙ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
ВЫПРЯМИТЕЛИ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1952

內 容 提 要

这本小册子介绍了固体整流器（氧化銅和硒整流器）及其在各种电路中的应用。列举了收音机与发射机用整流器的典型設計，必要的圖表及参考資料。

半 导 体 整 流 电 路

著 者: 苏联 В. Ю. 罗 金 斯 基
譯 者: 王 怀 亮
出版者: 人 民 邮 电 出 版
北京东四区 6 条胡同 13 号
印刷者: 人 民 邮 电 出 版 社 南 京 印 刷
南京太平路 戶部街 15 号
發 行 者: 新 華 書

書号: 无97 1956年10月南京第一版第一次印刷 1—10, 270 册
787×1092 1/32 32頁 印張2 字數 41,000 字 定价 0.23 元

★北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八号★
統一書号: 15045

目 錄

緒 論	(1)
半導體整流器的作用原理	(5)
矽整流器	(11)
矽整流器的电气特性	(16)
氧化銅整流器	(22)
氧化銅整流器的电气特性	(24)
矽整流器和氧化銅整流器的比較	(26)
整流电路及其計算公式	(28)
純电阻負載的半波整流电路	(30)
电容性負載的半波整流电路	(32)
电感性負載的半波整流电路	(35)
純电阻負載的全波整流电路	(36)
倍压整流电路	(38)
整流器中的損耗	(41)
整流器的設計	(43)
濾波器的設計	(52)
結論	(58)
附錄一：电源变压器鉄心的選擇	(59)
附錄二：濾波器扼流圈鉄心的選擇	(60)

緒 論

大多數現代發電站發出來的是交流電。交流電之所以如此普遍是因為它比直流電具有更大的優越性。它最重要的優點是變壓的可能性，它能夠從一個電壓變成另一個較高的或較低的電壓，這種變壓的可能性被普遍應用在電站與用電地區間的遠距離高壓電力傳輸上，用高電壓輸電可以減少輸電綫上的損耗。

交流電流就是這樣的電流：它的大小和方向的變化經過相等的时间間隔（ T ）周期地重複變化着。在一秒鐘內電流周期性變化的次數叫作交流電流的頻率（ f ）。頻率的單位是赫茲（赫），等於每秒一周：

$$f = \frac{1}{T} \text{ 赫。}$$

在蘇聯，所有交流市電的電流：都隨時間：按正弦規律變化（圖一），頻率為50赫。

日常生活中使用的交流市電電壓是127伏或220伏。

用交流電供給無線電設備的電源是很方便的。交流電可直接供給旁熱式真空管的燈絲電路，也可以供給直熱式功率管的燈絲，而不致在無線電設備的輸出中產生顯著的交流聲^①。但是電子管的板壓和柵壓必須以直流電供給。

將交流變為直流需用特殊設備——只通過單向電流的整流

註① 交流聲就是以不斷斷的音調的形式出現在收音機中的噪擾。

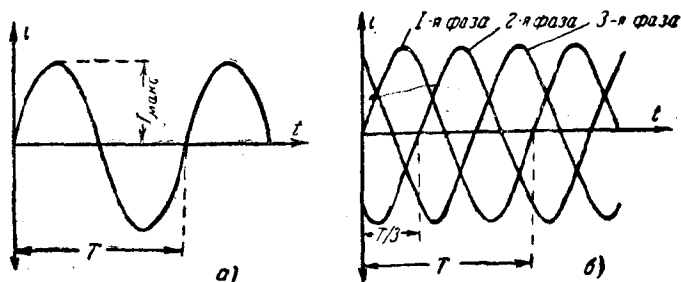


圖 1. 交流电流

a—单相电流;

b—三相电流。

器。整流后得到的是脉动电流，即电流的方向不变而大小随时間改变。圖二为由全波整流电路得到的脉动电流的圖形。

脉动整流电流可以看作是直流分量与交流分量（諧波）之和。諧波的頻率是市电頻率的倍数。例如，脉动电流的最大值（振幅） $I_{B \cdot \text{max}}$ （圖二）是下列各項之和：

a) 直流分量 $I_0 = 0.636 I_{B \cdot \text{max}}$;

b) 二次諧波分量（其頻率為市电頻率的兩倍），等于 $0.424 I_{B \cdot \text{max}}$;

c) 四次諧波分量，等于 $0.085 I_{B \cdot \text{max}}$;

d) 六次諧波分量，等于 $0.038 I_{B \cdot \text{max}}$ 。

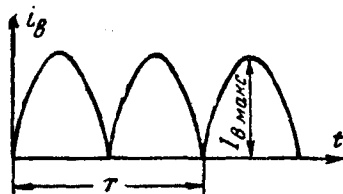


圖 2. 整流后的脉动电流

可以看出，諧波振幅隨頻率的增加而減小。如果忽略高次諧波的小电流，則脉动电流如圖三所示。由圖可見：脉动頻率等于市电頻率的兩倍。

不能用这种电流供給收音机或擴大机的电路，因为真空管板極电流將随整流电压波紋的頻率急速地变化。

整流电压波紋的大小通常用波紋因数 k_n 来表示。 k_n 为整流电压的交流分量 $U_{n.макс}$ 与直流分量 U_0 比值的百分数：

$$k_n = \frac{U_{n.макс}}{U_0} \times 100\%$$

如果負載为純电阻，則波紋因数亦可用电流表示：

$$k_n = \frac{I_{n.макс}}{I_0} \times 100\%$$

因为在这种情况下， $U_0 = I_0 \cdot R_n$ ， $U_{n.макс} = I_{n.макс} \cdot R_n$ ， R_n 为負載电阻。

表一列举了負載为不同形式时波紋因数的容許值。

如果波紋因数超过容許值，必須採取措施以使其减小。为此，在整流器的輸出电路中接入附加網絡——平滑滤波器。

一般是按整流电路和所用的整流元件來区分不同类型的整流設備。

在这本小冊子里，我們只研究半導體整流器，其作用原理是基于半導體与金屬間接触点的整流特性。这种整流器中最常

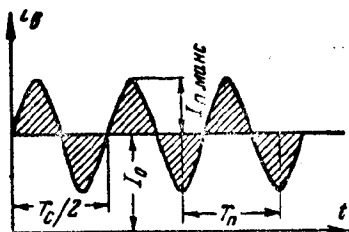


圖 3. 整流电流的直流和交流分量。

T_c —市电电流的週期；

T_n —电流波紋的週期。

見的是硒整流器和氧化銅整流器。它們具有許多优点：沒有灯絲电路和真空玻璃泡，能整流低电压，尺寸較小，效率高，能在很大的溫度範圍內工作等。

表一 直流电能消耗器及其特性

能 量 消 耗 器	电 的 特 性		
	电压, 伏	电流, 安	容許的电压或 电流波紋因數 k_n , %
电源用交流市电的收音机:			
а) 低頻放大器輸出級板極电路	240—450	0.04—0.1	<0.5
б) 前級放大器, 高頻放大器, 变频器等的板極电路	200—300	0.01—0.02	<0.1
в) 电动式喇叭的激励繞捲	60—240	0.015—0.04	<20
г) 直热式小功率管的灯絲	2—6.3	5 以下	<0.5
小功率振盪器 (高頻放大器的电子管):			
а) 振盪器板極电路	450 以下	0.1 以下	<0.5
б) 真空管灯絲	2—20	2 以下	<0.1
10—25 瓦短波發射机的高頻放大器 (直热式电子管):			
а) 板極电路	750 以下	0.1 以下	<0.1
б) 燈絲电路	4—20	5 以下	<0.5
小功率直流电动机	120—240	0.5 以下	<5

半導體整流器的作用原理

半導體整流器是夾在兩塊金屬電極間的半導體層。現時應用最廣的是矽整流器和氧化銅整流器。此外也有用其他半導體材料的整流器（如砷、銻及二氧化鈦整流器等）。

圖四為半導體整流元件的截面略圖。圖中電極A作為陽極，K作為陰極。二電極之間是半導體層。這種整流元件的整流作用在於其電阻隨電流的方向而急遽變化。當電流方向為自陽極流向陰極，即電壓的“正”加於陽極，“負”加於陰極時，電阻非常小。

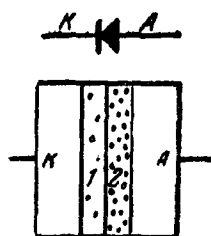


圖 4. 半導體整流元件略圖
K—陰極；A—陽極；
1—閉鎖層；2—半導體層。

自陽極流向陰極的電流稱為正向電流 I_{np} ，此時加於整流元件的電壓稱為正向電壓 U_{np} 。 I_{np} 有時也叫作整流器的通向電流。

當電流反向，即自陰極流向陽極時，整流元件的電阻急遽增長。此時電流稱為反向電流 I_{op} 。反向電流是在反向電壓 U_{op} 作用下產生的，也就是電壓的“正”加於陰極，“負”加於陽極。反向電流的存在乃是半導體整流器的特點，它與“理想”整流器有很大差別。

為了了解半導體整流器作用的物理過程，必須，那怕很簡略地，熟悉一下固體的基本電氣特性。

所有的固體可以按照其導電能力分為導體，半導體和絕緣

体（介質）三类。电導体的电阻非常小，主要包括金屬，其电阻率約在 10^{-4} — 10^{-5} 欧—厘米之間，且隨导体溫度的上升而增大。絕緣体（介質）在正常条件下实际上是不導电的，其电阻率約为 10^{10} — 10^{18} 欧—厘米。半導體（电子的）按其电气特性是介乎導體与絕緣体之間的，其电阻率在很大的範圍內变动，約自 10 至 10^{10} 欧—厘米，且隨着半導體溫度的升高而减小。

大家都知道，一切物質都是由原子構成的。每一种化学元素的原子都是由帶正电的原子核与圍繞着它的帶負电的电子組成的。电子按照一定的封閉曲綫（軌道）繞原子核运动。所有电子都是一样的，每个电子的电荷 $e=1.6 \times 10^{-19}$ 庫侖。原子的特性决定于原子核的电荷，其数值总是电子电荷的整数倍。因此，原子核的电荷 $Q=eZ$ ， Z 为一个整数，称为元素的原子序数。在正常状态下，原子是中性的，所以原子內电子的总数等于原子序数。顯然，原子量愈大，原子序数也愈大。

电子沿着与原子核距离不同的軌道运动着，因此可以說，原子的电子殼層是由几个單独的电子層構成的。离原子核最近的內層电子，由于静电吸力，与核牢固地联系在一起，最外層的电子与核的联系較弱。这些外層电子决定了原子的化学特性。

由于原子中有帶电質点，当兩個原子距离足够近时，就会产生互作用力。这些原子間的作用力主要作用在外層电子上，迫使它們按照新的、圍繞着兩個原子的軌道运动，这就發生了化学的結合而形成了分子。

气体，液体和固体特性的顯著不同是由其原子及分子間互

作用力的性質决定的。气体的这种互作用很小，其原子与分子构成了一个自由的、不規則地运动着的質点羣。

液体質点間的互作用較大，其分子紧紧地挨在一起，但是能在它所佔据的容積內非常慢地移动。

固体中的分子力已大到使原子不能自由移动，其在空間的位置完全固定，而只能圍繞着这个位置作不停的振动。振幅的大小与溫度有关：溫度高时振动强。可作为固体特征的是所謂晶体結構，即質点在空間有規律和有秩序的排列。固体原子互相对称地排列着，構成了晶体点陣。晶体的强度决定于原子排列的内部对称性。

早在本世紀初，俄國学者Л.Н.曼傑里什达姆院士和H.А.巴巴列克西院士的實驗已經証明：金屬中电荷的移动（电導）是由电子來完成的。

金屬原子的基本特点是：位于外層軌道的电子与核的联系很弱，很容易与原子脱离。金屬的結晶体可近似地看作是一种电子“云”，在这种电子“云”中，在一定距离上分布有正游子（即失去一个或几个电子的原子）。脱离了自己原子的外層电子，在晶体点陣內毫无規律地移动着，通常叫作傳導电子，因为金屬內电流（电荷）的傳導正是由它們來實現的。金屬內傳導电子的数目很多（等于外層电子的数目，即每立方厘米約 10^{22} 个）。顯然，这就决定了金屬的非常大的电導率。

上面已經提到，金屬的电阻隨溫度的上升而增大，这是因为傳導电子与晶体点陣節（узел）越來越多的碰撞的結果。溫度升高实际上并不改变傳導电子的数目，因为所有位于外層軌

道的电子在極低温度时已經脫離了自己的原子而在点陣中运动了；而对于位于內層軌道的电子，要想脫離原子，則必須很高的温度（通常高于金屬的熔点）。

如果有其他的雜質的原子落進金屬的晶体点陣，就会引起新的不均匀性（点陣的热振动也引起不均匀性），因此雜質能使金屬的电阻增加。

絕緣体和半導體与金屬不同之处在于：其晶体原子的外層电子与原子核緊密地結合在一起，因而不容易脫離。这种結晶体的自由电子数目很少，如果其中不含雜質，也不受电离因素的作用（例如光或上昇的温度），那它們就是絕緣体而只有很小的电導。雜質和电离作用能增加絕緣体的电導，从而使之成为半導體。

晶体受热（或受光的作用）后，其外層电子的能量增加，能脫離原子成为傳導电子，具有傳導电流的能力。如同在金屬中一样，温度的昇高使电子与点陣節的碰撞次数增加。但是傳導电子增加对半導體电導的影响超过了碰撞次数增加对电導的影响。这可由半導體的电阻随温度的上升而減小的事实得到証明。

如同在金屬中一样，雜質使半導體晶体点陣發生变形，因而增加其电阻。然而在半導體中雜質的作用并不止于此。假設在某种我們称之为基本物質的晶体点陣中含有一些雜質，其原子的外層电子与核联系較弱且容易与原子脫離。这些电子在基本物質的点陣節間移动着，能够攜帶电荷。在这种情况下，雜質帶來了傳導电子而使晶体的电阻率減小。

雜質对晶体的电導也可能有其他影响。有时候雜質的原子对电子有很大的親和力，即在原子的外層軌道上能容納一个或几个自由电子。这种原子的存在使基本物質的原子中的电子很容易自其外軌道上脫离。逸出的电子被雜質原子吸收并固定起来，而失去电子的原子則能在其空位上“吸引”鄰近原子的电子。

电子自一个原子到另一个原子的轉移过程，使得沒有电子的地方，即所謂“电子穴”，不断地无次序地在点陣中从这一原子向另一原子移动着。顯然，电子穴相当于正电荷，因为它是由失去电子而形成的。

如果把这种晶体置于外部电場中，电子穴的运动將會成为有秩序的而产生一定方向的电流。在这种情况下，电流并不是由于从这一原子轉到另一原子并被固定在那里的电子所引起，而是由于电子穴的不断运动所引起的。因为电子穴具有正电荷，所以它的运动方向与电子的相反。这种类型的电導叫作“空穴电導”。

当晶体中同时存在有上述两种雜質时，电導將同时决定于自由电子和电子穴。

雜質是半導體中电荷攜帶者的主要來源，因此雜質的存在使半導體的电阻顯著降低。

应该把上述关于电傳導过程的說明看作是对于現代的固体电气特性理論底簡化和近似的敘述。

現代固体整流器的理論是苏联学者Б.Н. 达維多夫, А.Ф. 約飛, В.Е. 拉什卡列夫等建立起來的。按照这个理論，在整

流器的半導體与一个电极間有一电阻很高的薄層，叫作閉鎖層。閉鎖層的电阻可随整流器电流大小和方向的不同而在很寬的範圍內变化，从而保证了整流效应。

无数的实验表明：固体整流器的閉鎖層确实存在，其厚度約为 10^{-5} 厘米。已經發現氧化銅整流器的閉鎖層位于銅(陰極)与氧化銅之間，它是一种化学上純淨的氧化銅層(不含氧化物)，比其余含有大量氧气的氧化銅層具有更大的电阻率。

閉鎖層是在氧化銅整流器的制造过程中形成的。

氧化銅具有“空穴”电導，即攜帶电荷的乃是帶正电的电子穴。閉鎖層(1層)中每立方厘米电子穴的数目(圖四)比氧化銅的其余部分(2層)少得多(因而电阻大得多)。由于密度不同，电子穴就由2層向1層移动(滲透)，于是在兩層的交界处就產生了空間电荷：2層为負，1層为正。这些电荷的电場將要阻碍电子穴的移动，直到它們停止为止。这个过程是在整流器沒有电流通过时，即早在閉鎖層形成时就已經發生了。

如果在整流器上加上电压，使陰極為負，陽極為正，則外电場的方向將帮助克服空間电荷的电場而使电子穴自2層向1層的滲透增加。这將導致閉鎖層中电子穴的飽和，于是使閉鎖層的电阻减小且等于半導體其余部分的电阻。此时流过整流元件的电流即所謂正向电流。当極性反過來时(陰極為正，陽極為負)，外电場与空間电荷电場重合，不僅將阻碍电子穴的繼續滲透，而且还要將所有早先滲透到閉鎖層的电子穴全部驅回到2層。于是閉鎖層的电阻急剧增加而流过整流器的电流非常

小，这就是反向电流。

用同样方式可以说明硒整流器的作用。硒也是空穴电导的半导体。虽然硒整流器的閉鎖層的實質到現在還沒弄清楚，但已經知道它是位于硒層与陰極之間的。

硒 整 流 器

硒整流片乃是上面帶有薄硒層的圓片或墊塊，在硒層上塗有易熔金屬作为接触層（所謂的陰極層）。

整流片的襯墊（下面的電極）是用軟鋼或鋁压制成的，厚度为0.8—1.5毫米。小电流整流器的襯墊压成直徑为5—10毫米的圓片，大功率整流器則採用墊塊狀的襯墊，其外徑可大至120毫米。

大多数工業產品的硒層是用下述二法加上去的：在熾熱的襯墊上塗上所謂的无晶形硒，或者把粉末狀的硒熔在襯墊上。

上面的電極（陰極）塗在硒的表面上，電極的材料是銀鎢合金，有时在合金中还加些鈹。可以用兩種方法把電極放到硒上：用特殊的金屬噴敷槍將鎔化了的金屬噴上去，或在真空中使金屬蒸發到硒的表面上。

为了防止襯墊与陰極短路，后者不要塗在整流片的整个面上。当然，这样一來，整流器的工作面積就縮小了。例如：当襯墊的外直徑为45毫米时，把陰極塗成內徑12毫米，外徑40毫米的圓环，这样的整流片的工作面積等于：

$$S_{\text{有效}} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = 11.45 \text{ 平方厘米}$$

約等于整個襯墊面積的75%。

通常整流片都裝配成套（称为整流堆）。成套整流器的結構形式決定于它的用途、功率及所用整流片的尺寸。

圖五是一個整流堆裝配的例子，對於外徑在18毫米以上的整流片，這是典型的裝配。在圖中的裝配螺栓1上可以裝上所需數目的整流片（不超過30—40片）。接線片5和11是為了按照

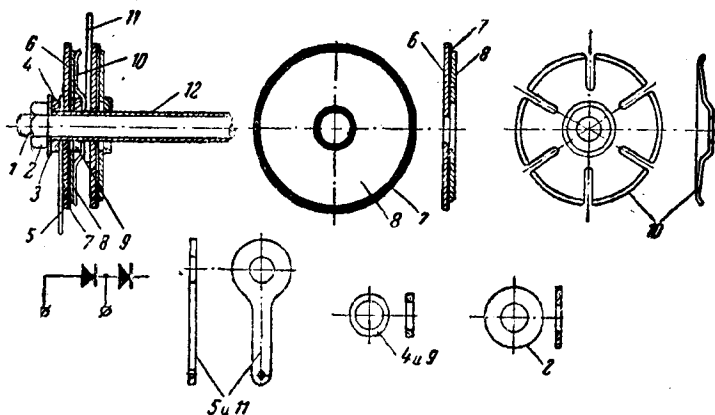


圖 5. 整流堆的零件

1—金屬裝配螺栓(或雙頭螺栓); 2—金屬螺母; 3—金屬墊圈; 4—絕緣墊圈; 5—陽極接線片; 6—陽極; 7—整流層; 8—陰極; 9—絕緣墊圈; 10—彈簧墊圈; 11—陰極接線片; 12—絕緣筒。

線路把整流片與其他元件連接用的。

最常用的整流堆的連接線路及其中整流片的相應位置見圖六。整流片的大小和數量按照整流電壓和電流的值選擇（算法見后）。

上面曾經提到，小功率整流器通常是用直徑為5—10毫米

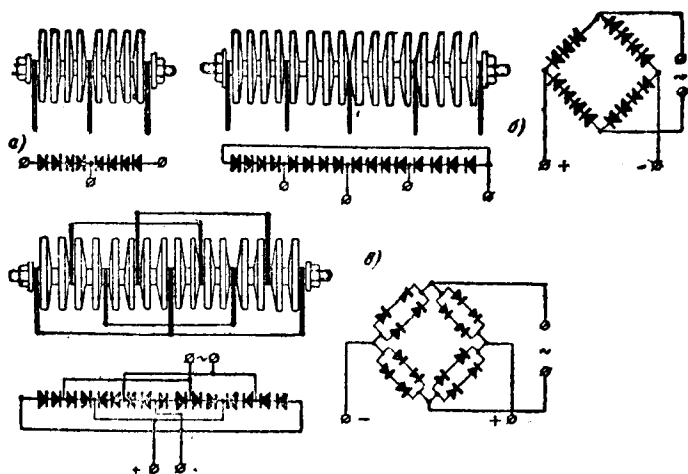


圖 6. 整流堆中整流片的接法

a—有中心抽头的接法；b—桥式接法；c—桥式接法（兩片并联）。

的整流片装配成的。圖七繪出了这类整流器的一个例子，它是由50片直径为7毫米的整流片串联组成的。整流片1装在用聚苯乙烯制成的筒状外套2内。这个管子预防了整流片间的短路，并作为它们的保护罩。借助于弹簧3和螺钉4保证了整流

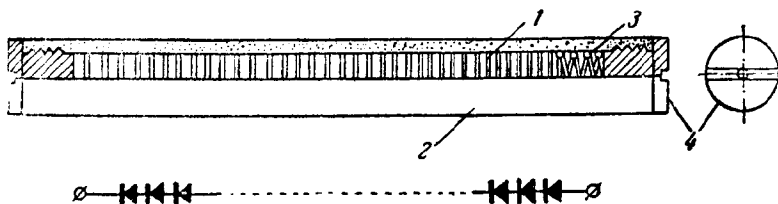


圖 7. 小电流高压硒整流器

1—整流片；2—筒状外套；3—弹簧；4—螺钉。