

科學譯叢

——物理學：第3種——

固體的電阻

阿奇路維契著

科學出版社出版

科學譯叢

——物理學：第3種——

固體的電阻

Э. И. Адирович

陶鈞譯

科學出版社出版

內 容 提 要

本書用比較通俗而淺近的理論，敘述和解釋了固體的電學性質，從原子構造的觀點，深入淺出地解釋了什麼是導體、半導體和電介質。是一本很好的半通俗性的中級讀物。

固 體 的 電 阻

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

原著者	Э. И. Адирович
翻譯者	陶 鈞
出版者	科 學 出 版 社 北京東四區帽兒胡同 2 號
印刷者	北 京 新 華 印 刷 廠 阜成門外北護士路
發行者	新 華 書 店

(譯) 54096	1954 年 12 月 第 一 版
自然: 099	1954 年 12 月 第一次印刷
(京) 0001-5,220	開本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$
字數: 27,200	印張: $1 \frac{21}{32}$

定價: 3,600 元

目 錄

緒 論.....	1
原子的電子殼層.....	5
電子在固體裏的能態及運動.....	12
金 屬.....	23
電介質.....	29
半導體.....	36

緒 論

從太古到現在的全部歷史上，人的實際活動和固體材料的使用密切地聯繫着。沒有金屬，石塊，木頭，陶器，現代技術甚至生活本身都將成爲不可能。

在改進和改變生產工具上，人們同時改進和改變了那些製造工具用的材料。國民經濟中所用的絕大多數材料並非天然地存在在自然界裏。它們是按照實踐上所提出的那些要求用人工方法製造成的。各式各樣的合金、水泥、瓷、電木以及其他許多材料——都是人們有目的活動的成果。

科學家和工程師們創造了大量人們在各種各樣的活動領域裏所需的各種固體材料。他們能够成功的原因在於發現並理解了確定固體性質的那些客觀規律。領會了這些規律，人們便會利用它們來製造具備新的、以前從未見過的性質的物體，而這些性質滿足了材料的專門用途。

第十九次黨代會關於第五個發展蘇聯五年計劃的訓令上規定 1955 年電能生產要比 1950 年增加約 80 %。世界最大的發電廠——伏爾加河上的古比雪夫水力發電站即將發電。發電廠總產量在五年裏約增加一倍。同時，將更進一步地繼續及擴大蘇聯水和燃料的動力富源上的開拓工作。

爲了要勝利地實現在工業、農業、運輸及日常生活電氣化方面所提出的任務，必須要有具備完全不同電性質的各種高質

量的材料。創造這類材料及其正確的使用需要科學家和各種科學及技術領域裏工作的實踐家密切的合作。要實現科學家和實踐者在這一方面的聯系。廣泛地普及關於固體電性質的現代知識就是一個方法。本書目的亦在於此。它是供具備中等文化水平讀者閱讀。

* * * *

電機工程上決定材料使用的主要性質是它的電阻。物體的電阻愈大，它就愈不會傳導電流。根據電阻率的大小（該材料做成長 1 厘米及截面 1 平方厘米型體的電阻），所有物體分為導體、半導體及電介質三類。

固體導體——電阻率 ρ 為 $10^{-6} - 10^{-4}$ 歐姆-厘米的金屬及其合金。大家都知道：石墨（ $\rho = 0.003$ 歐姆-厘米）是唯一非金屬的固體導體。

屬於電介質的有各種結構及成分的物體。在這裏有礦物——石英及硫，無機非晶體物體——玻璃、瓷，以及合成有機化合物——硬橡膠、聚苯乙烯、聚乙烯及其他。電介質電阻為 $10^{14} - 10^{18}$ 歐姆-厘米。

半導體佔據了導體及電介質間的過渡地帶；矽、硒、碲、鎢等元素及其化合物，各種金屬氧化物以及其他許多物質都是半導體。

要將出產電能（發電機）的產地和使用電能者聯系起來，我們利用金屬。由於金屬電阻很小，線路上放出的熱量很少，也就是說能量的耗損極微。

在電機工程裏，電介質和導體同樣重要，因為僅將發電機

和電動機或使用器具聯接起來是不夠的，還必須將電流的迂迴路徑截斷。否則電流便通過電線桿，通過地面，通過電機的金屬體等等。要想避免這些，必須將電路絕緣起來。因此我們利用電介質——高電阻的物質。

半導體是不好的導體和不好的絕緣體。長時期來，經過研究的階段，它們實際上並沒有被使用在電機工程上。近年來，由於它具有整流，放大以及將熱和光轉變成電能的性能，半導體獲得了廣泛及重要的用途。

下面的例子幫助我們明確地想像出：各種固體電阻大小相差是多麼大啊！從很好的電介質，例如極純的石蠟上割下一塊 1 毫米厚，截面為 1 平方厘米的材料。它的電阻為 10^{17} 歐姆。同樣斷面的銅線要有這樣大的電阻，它的長度和石蠟片厚度的比值便須等於兩者電阻率（銅為 10^{-6} 歐姆-厘米，石蠟為 10^{18} 歐姆-厘米）的反比值，因此，銅線長度應為 1 毫米 $\times \frac{10^{18}}{10^{-6}} = 10^{23}$ 厘米，即 1,000,000,000,000,000,000 仟米。這長度為太陽系大小的一億倍，等於地球到天河最遠的星的距離。地球上所儲藏的全部銅還不夠製造這樣一根導線。

幾乎不相互作用的個別原子所組成的稀薄氣體，在通常條件下總是電介質。那麼為什麼由同樣原子構成的固體，它的電性質相差得這樣厲害呢？為什麼在一種場合下原子間相互作用使固體成為導體，而在另一場合下——電介質，雖然在所有固體中，原子間距離具有同樣的數量級，約等於一億分之幾厘米？

這些問題僅能用近代固體物理學來回答，後者是依據近 25—30 年科學家所發現的原子質點運動規律而來的。近代固體

物理學揭開物體的宏觀的電性質和它們微觀結構間的關係，並成為實際上使用電工材料的科學根據。

決定固體性質的電子過程理論是長時期顯著地落在研究外部宏觀的規律性的實踐及理論後面。解釋原子構造的量子力學已成為迅速並大有成效地發展近代固體微觀理論的必要根據。工程實踐上採用它亦愈為廣泛，同樣地，從實踐上又獲得進一步發展理論的實際材料。

蘇聯科學家對固體理論有很大貢獻。А. Ф. 約飛 (Иоффе) 院士及其無數學生在半導體及電介質的電性質上的工作具有基本的意義。Д. И. 布洛欣采夫 (Блохинцев)、Б. М. 烏羅伊 (Вулой)、В. Е. 拉希加列夫 (Лашкарев)、Я. И. 弗倫克耳 (Френкель)、В. Д. 庫茨涅卓夫 (Кузнецов)、С. Т. 科諾別也夫斯基 (Конобеевский)、Б. И. 達維多夫 (Давыдов)、С. И. 別加爾 (Пекарь) 以及其他許多物理學家都進行了很重要的研究。已經理解到：固體各種性質和組成它的原子的性質是如何聯系着的，及和原子間結合的本質是如何聯系着的。在許多情況下，這個理論已經能決定實際工作的路徑和方向。半導體物理學及製造方法就是一個例子。但是，用理論來解決具體問題：應該如何來改變成分及製造法藉以獲得具有所期望的性質的固體材料——還不是目前能做到的事情。

有效地發展固體物理學及它的應用的必要條件是理論和實踐的密切聯系。因此，除了物理學家們要知道該領域內廣闊實際工作的所有新結果外，工程師們必需精通固體的理論，廣大的人們即使不成為理論物理學專家，也必需通曉這個理論基礎。

原子的電子殼層

固體的電性質和形成這些物體的原子本質有關。例如，門捷列夫元素週期表(參考後面的表)的第一類及第二類元素在固態下是金屬。相反的，週期表第五，六及七類所屬原子——磷、砷、硫、銻、硒、碲——形成的許多簡單固體，以及固體氮和氧都不是金屬。因此，原子在門捷列夫週期表裏的位置和相應固體的電性質間存在着一定的聯繫。但是這個聯繫並非單值的。除了形成物體的原子本質外，物體的電性質還和原子間結合的性質有關。這一點在碳的例子上看得很清楚，它的一種晶體變態——金剛石——是電介質，而另一種——石墨——是導體。

固體中主要負荷電流者是電子。固體的離子的導電性在本質上和液體電解質的導電性並無區別，我們在下面將要講到。僅在電介質及通常在溫度升高後，離子導電性才起着重要的作用。

要想懂得為什麼在一些固體(金屬)裏產生電流，即被調整好的電子流，而在另一些固體(電介質)裏不產生，首先應知道電子在原子裏的運動規律。

根據廣泛和多方面的實驗，我們知道：原子是由帶正電荷的核及環繞核作複雜形式運動的電子所組成。原子核大小的數量級是 10^{-12} 厘米；原子的電子殼層伸展範圍的大小約等於 10^{-8} 厘米。原子裏電子數等於它在門捷列夫週期表上的序數。

在原子裏所發現的兩個規律性成為微觀世界——原子質點

及亞原子 (субатомная) 質點的世界——的基本特性。這就是量子化及所謂包里 (Pauli) 原理或電子態不相容性的原理。

要明白什麼是量子化，我們將電子在原子裏的運動和物體按照古典力學定律所產生的運動作一比較。行星環繞太陽的運動可作為這類運動的一個例子。

按照古典力學的定律，質點可以具備着某種能量來環繞引力中心運動，能量可以從隨意多小到大得引力無法保持它的運動。根據質點的能量大小，它便能在任何一個軌道上運動着。用量子力學決定電子的運動時，原子裏電子的能量便成為某個完全一定的值，並且電子能量間的相差也為定值。譬如說，當然並非十分精確的，電子僅能在某一定軌道上環繞着原子核運動。電子在原子裏能夠具有的能量值總和形成了該原子能級的光譜（圖 1）。原子裏能量的量子化是在於每個元素中存在着電子能量可能值的完全一定的總和。

在和實驗結果完全一致下，量子力學指出：除了能量外，量子化還能指導着電子在原子中運動的某些其他的特性：軌道運動量的矩，這個矩在所指定方向上的投影，以及電子本身的機械矩（自旋）。後者是關於質點環繞本身軸迴轉的機械矩的量的類比（аналог）。

每一能級都和原子中電子的一定運動狀態相對應。倘若電子有相同的能量及相異的其他特性值，也就是說可能存在着某些不同的狀態，那麼相應的級便由在能量標度上相同的幾個級組成。為了簡略起見，我們講：“電子處在某級上”，這就是說電子在原子裏處於一定運動狀態下，而這狀態在能量標度上

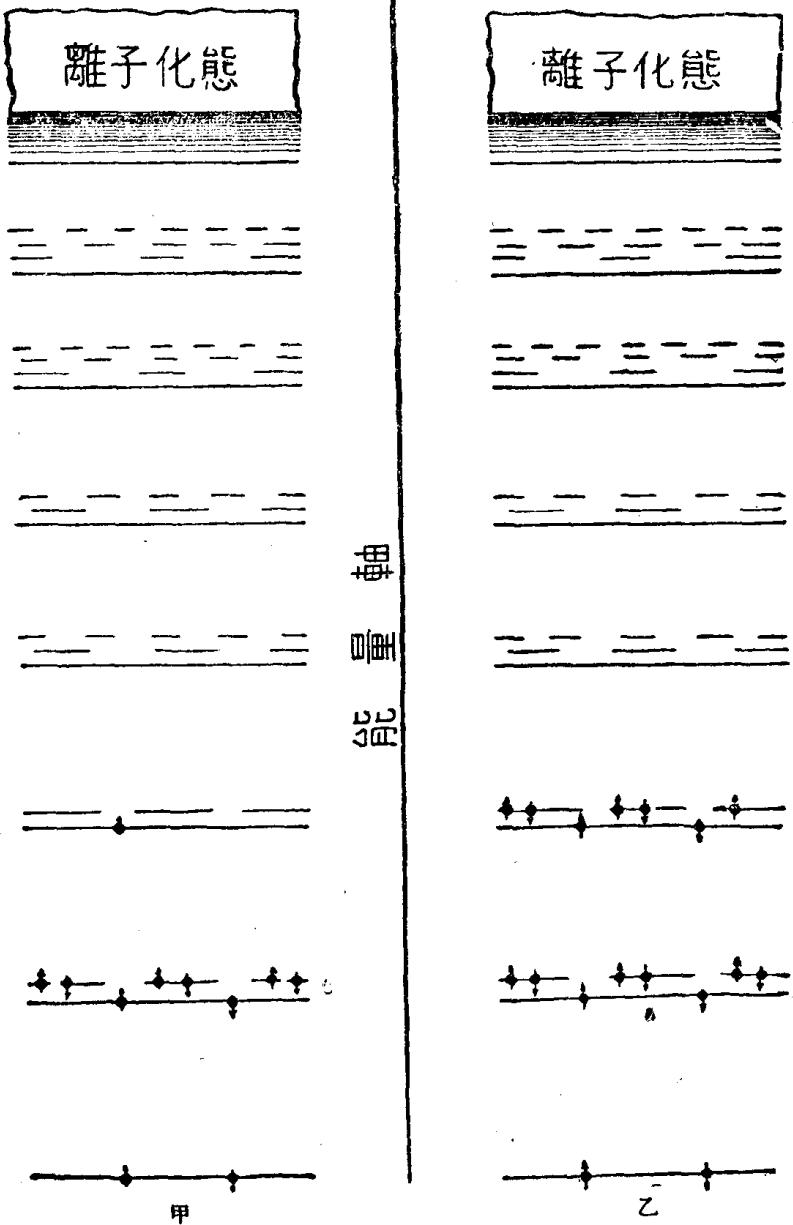


圖 1. 電子在原子裏的能級光譜
(甲) 鈉原子裏電子的分佈; (乙) 氯原子裏電子的分佈。

用這些級表示出來。

微觀世界的第二個特有的規律性——包里原理——排斥了在每一狀態中存在二個以上電子的可能性。例如，序數 z 的原子的電子殼層有 z 個電子。倘若按照古典力學的定律來決定電子的運動，那麼它們全部可以有相同的能量。例如，它們全部能靜止着或用相同速度運動着。量子力學排斥了這種可能性。原子或其他系統（分子、晶體）裏每一可能的電子運動狀態上，僅能有一個或二個電子——不能再多。同時，二個電子僅能在它們本身運動量矩（自旋）的相反方向場合下，才處在同一個狀態下。

研究原子現象時所發現的這個規律性表示了一個一般性的情況，即總和的性質並非它的構成部分的個體性質加起來的簡單結果。總和具有特殊集體的性質。尤其在電子的總和上，運動的相互結合便是這類集體的性質，它排斥了在同一運動狀態上存在兩個自旋方向相同的電子的可能性。

倘若在原子裏僅存在着量子化，而沒有包里原理所述的規律性，則所有電子都可以跑在同一級上。當所有電子轉移到最小能級時，它們必將具有最小的能量。但由於電子運動的相互結合，電子在原子裏不可能有這樣的分佈的。

我們再看門捷列夫週期表。第一個元素——氫——的原子裏一共祇有一個電子。在未激發的氫原子中，電子處在最低能態上——最小能量的級上。

氫後面的氦元素，它的電子殼層含有二個電子。在未激發的氦原子中，二個電子都處在最低的級上。同時它們自旋的取

向是處於二個相反的方向。

在鋰原子中，電子殼層由三個電子所組成，其中只有二個電子位於最小能量的狀態下。由於電子運動的相互聯繫性，第三個電子不可能處在同一級上，並且它的運動符合於具有較大能量的次一個可能狀態。

其他一切元素的原子裏，電子在能級上的分佈是根據包里原理來決定的。我們發現：元素化學性質的週期性也正是和這個情況密切結合着。

計算指出：原子裏的能級可以分成若干羣，並且在每一羣內部的級和級間能量相差小，而在羣與羣間能量相差大。原子裏能級簡圖如圖 1 所示。能量相同而其他電子運動特性不同的狀態用同一高度的級來表示。

門捷列夫週期表中每一元素和它前面元素的差別就在於它的電子殼層中多一個電子。將門捷列夫週期表和圖 1 所示原子中電子級簡圖作一比較。很清楚，週期表的每一週期相當於用電子來填滿一定的級羣。當該級羣所有狀態都填滿時，下一個原子便開始進入新的週期。

第一羣總共只有一級。氫（一個電子）和氦（二個電子）的電子殼層是和填滿這一級相當的。

第二羣由四個級所組成。其中三個級相當於能量相同而其他機械量值不同的狀態。在第二級羣上，很明顯地，可以有一個到八個電子。逐漸填滿這羣的級發生在門捷列夫週期表的第二週期原子上——從鋰到氖。

屬於完全填滿的級羣狀態下的電子，它們和原子核結合得

特別牢固也不參與原子間化學結合的形成。它們被稱為內電子。

在沒有填滿羣的級上的電子，它們和原子核離得較遠，和後者的相互作用亦比內電子弱。當兩個原子相遇時，電場顯著地改變了外電子的運動性質，因此在一定條件下，發生化學上的結合，並形成分子。故屬於原子級的未填滿羣上的電子，我們叫它為價電子。

門捷列夫週期表的第三個週期從鈉開始。圖 1 甲所示為未激發的鈉原子中電子如何按級分佈着，此處電子用小黑圓點表示自旋方向用箭頭表示。鈉原子有十個內電子和一個價電子。

氯原子（圖 1 乙）有十個內電子和七個價電子。氯後面是元素氬，它填滿了第三級羣的最後一個空缺狀態。氬原子裏沒有價電子。

屬於門捷列夫週期表同一類元素的原子具有相同數目的價電子。它們的殼層僅在填滿級羣中電子數目上有所不同。例如，鋰原子——二個內電子，鈉原子——十個，鉀原子——十八個等。而鋰、鈉、鉀以及第一類中用來開始元素表相應週期的一切其他元素——都只含有一個價電子，鈹、鎂、鈣、鋅及週期表中其他第二類元素都含有二個價電子；第三類元素的原子裏含有三個價電子等。因此，每一類元素具有相同的價性和相似的化學性質。元素化學性質的週期性也就決定在量子規律性上並且在其中獲得解釋。

通常，電子在原子裏按級分佈情況是這樣的，即原子具有

所有可能的能量值裏最小的一個值。在沒有任何外界作用給它額外能量前，原子處於這種未激發狀態中。當吸收了光或和其他原子相碰撞時，某電子便能從通常所處的那一級躍遷到較高的空着的一級上，結果便形成了激發原子，在電子相反的躍遷上，原子放出光或者在碰撞過程中給其他原子以熱能，即雜亂運動的動能。

圖 1 頂上，在原子裏電子能級光譜上方，畫着整整一片的長條或能量區。它表示離子化狀態，電子得到很大能量使自己能完全脫離原子，那麼它便進入這一狀態。在這裏已經沒有單獨的級了。脫離原子的電子可以具有任意大小的能量，可以用任意大小速度運動。

電子在離子化狀態裏是自由的；它和原子並無聯系並且在移動時亦和它無關。用普通術語可以講：自由電子的能量不是量子化的。

在原子裏的電子，由於電的吸引力所致，和原子核牢牢地結合着。甚至要使最遠的價電子脫離原子核，也必須要有 100 百萬伏特/厘米大小的電場才行。

當氣體裏原子間相互作用微不足道時。單獨原子的性質仍保持原有的形式。因為普通溫度下熱運動的能量，以及普通的電場都不足使原子離子化，故事實上在氣體裏沒有自由電子。因此氣體在通常情況下是電介質。

只有在很強的電場下，電子加速的程度大得能從原子裏驅出新電子來，氣體裏才開始劇變地迅速增加自由電子數量，幾乎瞬息間產生很大的電流並在極短促時間裏氣體變成導體。這

樣便形成氣體的擊穿，閃電即為一個規模極大的例子。

電子在固體裏的能態及運動

在強電場（1百萬伏特/厘米左右）下，固體電介質中亦會和氣體一樣發生擊穿。但是在許多固體——金屬——裏，即使在弱的以及很弱的電場下亦會發生顯著的電流。這就是說，金屬和氣體的不同在於前者有自由電子。古典物理學就是這樣來解釋金屬的性質；至於解釋電介質性質時，它們就說不良導體裏所有電子都和原子核牢固地結合着。但是仍然不了解：為什麼一些固體裏的電子結合着，而另一些固體裏的電子是自由的，如同金屬裏自由電子為什麼會形成的？

孤立的原子裏，電子緊密地和核結合着。所有固體裏原子間的距離在數量級上是相當的。那麼為什麼金屬原子的相互作用能引起自由電子的出現，而在電介質裏就不能？這個相互作用是什麼？在低溫時為電介質而在高溫時為導體的半導體是怎麼回事？

爲了要明白如何在孤立的原子性質上產生固體的性質，我們研究一下在原子接近過程中固體的形成。爲了解釋得更確切些，我們敘述鋰金屬的形成，並研究下列人工過程。

將鋰原子按照它的晶體所具的那個幾何結構排列，但相隣原子間距離有數厘米。這樣一來便構成鋰的幾何的相似晶體點陣，但原子間距離很大，以至原子的相互作用微不足道及每個原子和孤立狀態沒有差別。然後，保持幾何上的相似，將這點

陣壓縮到原子間距離和真實的鋰晶體原子間距離一樣。這個人工的過程能使我們探索到：原子間如何引起顯著的相互作用，如何相應地改變電子狀態，孤立原子的性質如何地轉變成固體——鋰金屬——的性質。這樣的論證當然能用在任何其他的物質上。

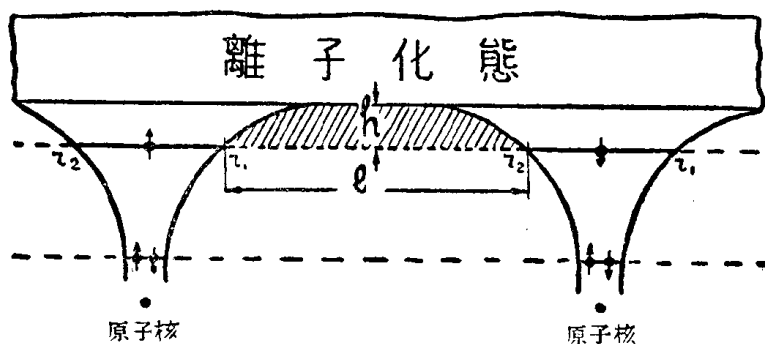


圖 2. 已被分開的鋰原子的點陣裏電子的勢能和級 r_1 和 r_2 “轉折點”；虛線表示阻礙價電子從一個原子轉移到另一個原子去的勢壘； h —勢壘的高度； l —勢壘的寬度。

圖 2 所示為原子間距離很大時，鋰原子裏電子的能態。曲線表示原子裏電子的勢能，後者決定於它對原子核的靜電引力。水平直線表示能級。在低下一級上有二個電子，在上面一級上有一個電子。為了簡單起見，圖上沒有繪出第二級和離子化狀態間的自由級。

倘若電子是按照古典物理學的定律來進行運動，那麼它便不能遠離原子核以使兩者距離超過相應級和勢能曲線相交的那些距離（所謂轉折點 r_1 和 r_2 ），電子和核在這樣距離上，它的全部能量都是勢能，動能等於零，也即電子速度為零——靜止着。