

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電 工 材 料

編 著 者

王家騏 俞國平

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電工材料

編 著 者

王家騏 · 俞國平

興業圖書股份有限公司出版

版權所有・翻印必究

中華民國六十八年九月一日

電 工 材 料

基本定價七元六角

編 著 者：王家驥・俞國平

發 行 人：王 志 康

行政院出版登記證台業字第〇四一〇號

出 版 者：興業圖書股份有限公司

打字排版者：百 祥 打 字 行

台南市勝利路一〇一巷十七號

發 行 所：興業圖書股份有限公司

台南市勝利路一一八號

電 話：（〇六二）三七三二五三號

郵 撥 南 字 三 一 五 七 三 號

學校團體採用購買另有優待

序 文

- 一、本書大致係遵照民國六十五年教育部公佈專科電機工程科「電工材料」課程標準編輯而成。
- 二、全書共八章，可供電機科及電子科一學期或二學期教學之用。
- 三、本書係參考下列書籍編輯而成。
 - (1) G. C. Jain "Properties of Electric Engineering Materials"
 - (2) R. M. Bozorth "Ferromagnetism"
 - (3) R. L. Sproull "Modern Physics"
 - (4) L. P. Hunter "Handbook of Semiconductor Electronics"
 - (5) A. J. Dekker "Electrical Engineering Materials"
 - (6) 西沢潤一教授著“電氣材料”
 - (7) 柳井久義教授著“電氣材料”
 - (8) 大原儀作教授著“電氣材料”
 - (9) 田中哲郎教授著“電氣材料”
- 四、本書內容偏重於第四章至第七章，其內容注重電工、電子零件之特性、構造、製作及用途，使學生對電工技術有一基本之認識。
- 五、本書採用之名詞，均以教育部公佈之電機工程名詞、電子工程名詞與物理名詞為準。如遇有尚未公佈之名詞，則參考其他書籍加以研究訂定，務以簡明適用且不易混淆為原則。
- 六、編者日文造詣甚淺，於參閱日文書籍時承蒙同窗好友楊博士之指點，特誌此申謝。
- 七、本書手稿承王惠民、傅以勇、朱樹民辛辛苦苦的代為謄寫與校對

Handwritten signature and date: 11/11

稿子，以及留美學人林碩士的提供資料，使本書得以如期完成，在此一併致謝。

八、本書乃作者在教學之餘草就年疏漏及謬誤之處在所難免，尚祈諸位先進不吝指正。

目 錄

第一章	電工材料概論	1
1-1	電工材料之重要性	1
1-2	電工材料之分類	2
第二章	物質之結構	5
2-1	原子之結構	5
2-2	分子的構造(鍵與其特性)	9
2-3	物質的構造	11
2-4	結晶質與非晶質	13
第三章	熱力學	14
3-1	熱 性	14
3-2	熱力學第一定律	23
3-3	熱力學第二定律	26
3-4	相及相圖	32
第四章	電導效應與材料	79
4-1	電導概論	79
4-1-1	固體之電導效應	81
4-1-2	導體、半導體與絕緣體之區分	82
4-1-3	液體與氣體之電導效應	84
4-2	導電材料	87

4-2-1	導電材料的特性 與分類.....87	4-2-3	電極材料.....116	90
4-2-2	電線與電纜材料			
4-3	電阻材料.....119			
4-3-1	電阻材料的特性 與分類.....119	4-3-4	薄膜電阻材料...135	
4-3-2	金屬電阻材料122	4-3-5	熱電阻材料.....137	
4-3-3	非金屬電阻材料126	4-3-6	保險材料及焊接 材料.....139	
4-4	絕緣材料.....140			
4-4-1	絕緣材料的特性 與分類.....141	4-4-3	無機固體絕緣材 料.....158	
4-4-2	氣體與液體絕緣 材料.....153	4-4-4	有機固體絕緣材 料.....167	
4-5	半導體材料.....176			
4-5-1	半導體材料之特 性與分類.....177	4-5-4	熱電效應與材料186	
4-5-2	二極體與雙極電 晶體效應.....180	4-5-5	特殊半導體元件 及其特性.....193	
4-5-3	光電效應與材料184	4-5-6	半導體元件之製 法及積體電路介 紹.....201	
4-6	電子放射效應與材料.....209			
第五章	介電效應與材料.....215			
5-1	介電性質.....215			
5-2	壓電效應.....224			
5-3	交流電場內之電子分極能.....224			
5-4	交流電場內之離子分極能.....223			

5-5	強電性材料	229
5-6	壓電材料	235
第六章	磁效應與材料	308
6-1	磁現象與理論	243
6-2	磁性材料之特性與分類	266
6-3	高導磁率材料	267
6-4	恒導磁率材料	282
6-5	壓粉磁性材料	285
6-6	氧化物磁心材料	287
6-7	永久磁石材料	291
6-8	特殊磁性材料	299
第七章	電工材料試驗法	243
7-1	電導材料試驗法	308
7-2	絕緣材料與介質材料試驗法	317
7-3	磁性材料試驗法	325
第八章	電化學	338
8-1	電池與材料	338
8-2	電鍍與腐蝕	343
8-3	防蝕方法	346

第一章 電工材料概論

1-1 電工材料之重要性

目前電機生產行業之發展非常迅速，這乃歸功於技術革新之緣故，同時在所有生產行業，爲了提高生產，將工廠之生產設備擴充或更新，或者爲了謀求自動化，對於電機機器所需求之條件大爲增加，並且由於生活進步，邁向現代化，所以在家庭生活上亦有各種家庭電化製品等之裝置。

在此種電機行業發展情形之下，以開發新產品作爲開始，謀求電機機器性能之提高及改善，不斷努力與研究，並且以電工學之基礎理論來印證，促進其發展與進步。

但是，將基礎理論實際應用於電機機器之設計時，因所使用電機材料的性質，而有很大的限制，有時會得不到所期望的結果。類似此種問題的解決，而能使機器之性質提高者，實有賴優良電工材料之出現。例如發明鍺之電晶體，不但使電子機件縮小，其性能又使真空管難望其項背，此爲最顯著之例子。

不過，雖然不斷地有各種新材料的發現，可是仍有使用從前材料的情形。例如，電力用電纜的絕緣紙等，不論有何優良如合成樹脂之絕緣材料出現，如今依然被盛用著。其理由不外乎價廉經濟，況且其本身又具有各種優良的特性，經長年使用後已熟知其性質，爲人們所信賴之故。

因此，並不一定需要新奇，而將使用之材料特性。加以靈活運用才是一件重要的事。尤其是電機機器一旦發生故障時，其影響之巨，

2 電工材料

爲我們日常生活所能體驗得到的。是故，長年使用之電工材料，並不因新材料有較多的優點，而輕易予以更置，須長時間作各種試驗，詳加研討後，再慎重的決定。

像這樣，雖然由於所使用電工材料之取捨和處理過程之不同，但終結起來，電工材料對於電機機器的性能，是最具有決定性的。因此，對最近有關電工材料之研究，不單從工學上的觀點着手，而且盛行著從物理及化學的基礎方面予以深究，乃理所當然。故除直接從事於電工材料之研究或生產者，理當努力研究外，至於一般電機工程人員，更應深入了解電工材料之特性，熟習材料之運用，這是一件很重要的事。應經常不斷地注意新材料，研討其在產品上是否具有可採性，同時努力提高機器性能和新產品的發展。

1 —2 電工材料之分類

電工上所用之材料，包括範圍甚爲廣泛。由物理性質分類，主要可分爲下列幾大種類：

I. 可導電材料 於電路中係以備電流之通路。視其應用之目的如何，吾人可分之爲下示三種：

(a)導體材料 此等材料應用於電路內之目的，單純爲傳導電流，故其電阻係數必須極低。不過仍有應用於電阻並非首要之電路者，其電阻係數則可稍高。金屬有最佳之導電性質，一般通用者有銅、鋁、鐵三種。

(b)阻體材料 此等材料聯接於電路之目的，係應用其通過電流所生之光、熱等效應，故其電阻係數可以較高。一般多用合金，鎢與碳可用作電燈之燈絲，充氣電子管內之若干氣體亦屬之。

(c)半導體材料 此等材料之電導係數介乎導體與絕緣體之間，其導電機構亦與普通之導體材料不同。於電路內多係應用其特殊導電性質，例如整流、放大、及光電效應等。化學週期表內第IVB類元素矽、鎢等均屬之。

I. 電子發射材料 此種材料均爲導體或半導體，主要用作電子

管之陰極，由其表面電射電子。

Ⅱ. 絕緣材料 此種材料應用於電路內，係防止電流之通過。故其電阻係數愈高時，通過之漏電電流將愈小。以元素形式存在之絕緣材料為數極少，大多數均係化合物質。可分為無機與有機兩大種類。

Ⅳ. 介質材料 絕緣材料係用以隔絕兩導體間所通之電流，此時將使兩導體間形成一電容器。於兩導體間存有一電位差時，乃使兩導體表面分別充成正負電荷，而於絕緣體內發生一電場。絕緣體於此種用法，謂之介質（dielectrics）。介質裝置於容體之兩電極間，其絕緣電阻固須甚高，以降低漏電；但容體之性質則係與介質之介導係數 ϵ 與介質損失有關。大部分絕緣材料均可用作介質，但仍以 ϵ 較大或吸收作用（at sorption effect）較小者為限。近日發現若干介質材料，其介導係數遠較普通之介質為大。其介質常數可大至數千乃至一萬，特名之為強電性物質（ferroelectric substance）。例如，酒石酸鹽、磷酸二氫鉀、及鈦酸鋇等屬之。

Ⅴ. 磁性材料 此等材料應用於磁路內，其磁導係數 μ 必須極高，以便於一定之激磁安匝下，可以發生較大之磁通過磁路。其磁滯效應必須較小，以便磁心內之功率損失可以較少。至於製成永久磁鐵時，此種材料之磁滯效應則須甚大，以便吾人可獲得一強力而耐久之永久磁鐵。任何物質均可保有若干磁性，但電工上所用之磁性材料， μ 均遠較空氣為大，特名之為強磁性物質（ferromagnetic substance）。例如，鎳、鐵、鈷及其合金均屬之。

Ⅵ. 熱電材料 為一種應用熱電效應之材料。

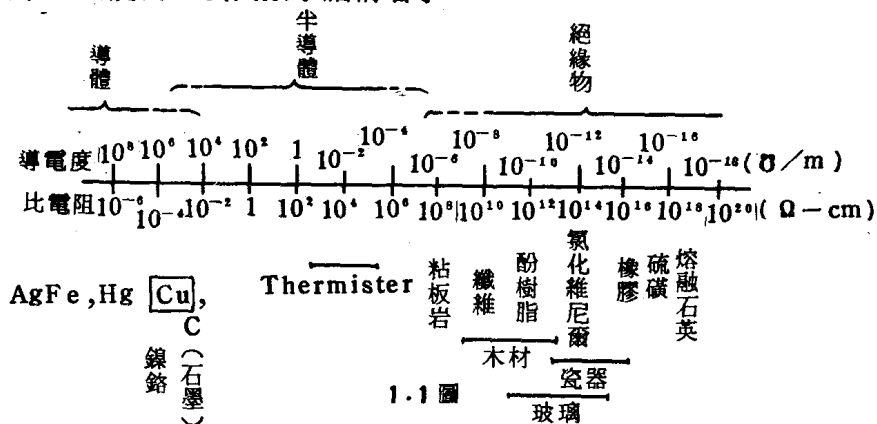
Ⅶ. 光電材料 為一種應用光電效應之材料。

Ⅷ. 其他種種材料 例如電機製造、送電線支架、電廠房屋等材料均屬之。

以上各種導電材料與絕緣材料依室溫時導電度及電阻之大小順序排列之，如第 1.1 圖。

4 電工材料

電工材料之知識，對於電機或電子工程師均極為重要。蓋一切電工上所用機械或裝置，其設計雖可優良，計算亦可極度精密；若所用之材料有所偏差，則一切工作均屬徒勞無益。何況尚可引起意外之危險，使用戶遭受損害。故對材料之性質，尤非充分熟悉並妥為選擇不可。近日原子物理與固體結構方面之迅速發展，對於電工材料之改良，均有良好之表現。其中對於磁性材料，絕緣材料、以及半導體方面之研究，成效尤著。各種材料之性質，須視其所含原子之結構而定。故本書之說明，試由原子結構著手。



1.1 圖 習題一

1-1 試述電工材料之特性。

1-2 試述電工材料之分類。

第二章 物質之結構

2-1 原子之結構

(1) 素粒子

我們知道物質是由原子所構成。從前認為此種原子是構成物質不可再分之單位，但現在已證實原子係由更小的素粒子所組成。即原子的中心是原子核，其內部帶有陽電的質子與帶中性電的中子存在，且在原子核周圍，有帶陰電荷之電子，於軌道上高速度旋轉。

這些素粒子所帶的電荷與質量極微，其值如表 2-1。

表 2-1 素粒子之質量與電荷

	電 子	陽 (質) 子	中 子
質 量	m_0	$1836.1 m_0$	$1840 m_0$
電 荷	$-e$	$+e$	0

$$e = 1.6021 \times 10^{-19} [C] \quad m_0 = 9.1091 \times 10^{-31} [Kg]$$

原子內素粒子的運動，不能用牛頓 (Newton) 力學來表示，而可以最近始被確立的新力學——量子力學 (quantum mechanics)，予以說明，如以一定之初速投擲棒球，其運動可用牛頓運動方程式，完全地表示出來一樣，素粒子之運動，也可用量子學 (Schrodinger) 之波動方程式，完全地表示出來。但是，欲解此方程式，在現階段仍有許多困難，故只能利用波耳 (Bohr) 之前期量子論，來說明電子之運動。

(2) 電子的運動與能

依波耳量子論，電子係以如圖 2-1 所示，帶陽電荷之較重原子核

6 電工材料學

爲中心，在下式所示，半徑之圓周上，
做周期性圓周運動。

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon}{Z \pi m e^2} \quad (2-1)$$

n ：正整數 h ：Planck 常數

ϵ ：介值常數 Z ：原子序

m ：電子之質量 e ：電子之電荷

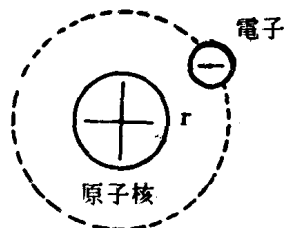


圖 2-1 原子之構造模型

上式之 n 因係正整數，所以電子的安定軌道有無限多。

既，對應於 n 之 1、2、3、……之電子軌道半徑 $r_1, r_2, r_3, \dots$ 有

$$r = \frac{h^2 \epsilon}{Z \pi m e^2}, \quad r_2 = 4 r_1, \quad r_3 = 9 r_1 \quad (2-2)$$

之關係。

再者，位於這些軌道上之電子，其能量 E 爲一定，可由下式定之。

$$E = -\frac{Z^2 m e^4}{8 \epsilon^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (2-3) \text{ (註1)}$$

圖 2-2 表示 $Z = 1$ 時，式 (2-3) 之關係，此圖稱爲能階圖，應對應於各能量的垂直標度稱爲能階 (energy level)。

單獨存在之原子內，電子之能量，因其非爲連續之變化，故並不如圖示之連續，而是依 n 值來定其一點一點之值。

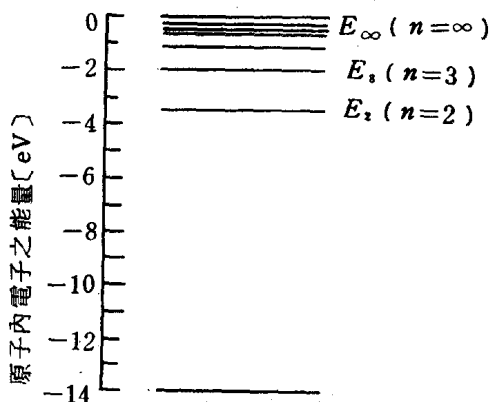


圖 2-2 能階圖(1)

但是，經再研究後，證實了原子內電子的狀態，除 n 值以外，尚可由另三個數來決定。亦即由此被稱

(註1) 此式之能量值爲負值，乃取 n 爲無限大時 (即無窮遠處) 之能量 e 爲 0，故軌道上電子之能量與 0 之差，便以負值來表示。

爲量子數的四個數來決定。

(3) 電子的排列

各元素原子內有一定之電子數存在，這些電子的排列，乃依據苞立不共容原理分佈於各層電子軌道上。就是：「某電子，依四個量子數之組合，來決定電子的狀態時，祇能容許有一個電子之存在」之原理。（即沒有任何兩個電子具有相同的四個量子數）。

通常，四個量子數，以 n , l , m_L , 及 m_s (註2) 表示，當主量子數 n 之值決定時，其對應之其他量子數之各值亦可決定。例如，對某 n 值， l 可取 $0, 1, 2, 3, 4, \dots, n-1$ 之值。

對應於 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ 的電子層，分別稱爲 K 層 (K -shell), L 層 (L -shell), M 層 (M -shell), N 層 (N -shell), 對應於這些 n 值，所存在的不同 l 值其電子數，和排列情形如圖 2-2 所示。

就原子之能量或其軌道，作更詳細的調查時，雖然大體上，可由 n 及 l 來決定，但有外電場作用時，電子便受影響，而改變了 m_e (事實上 m_e 乃是指在磁場中，軌道的可能方向)，在此情況下， m_s 便可表示出電子在軌道上自轉之情形。

承上可知原子內電子之能階，實際上不似圖 2-2 那樣單純，以模型來表示時，即如圖 2-3 所示之情形，而是由更細分的能階集團所組成。

(4) 原子內電子與元素的性質

元素的主要物理性質、化學性質，大多由位於最外層之電子來決定。

這些電子通常稱爲價電子 (valence electron)。由於元素都按其原子

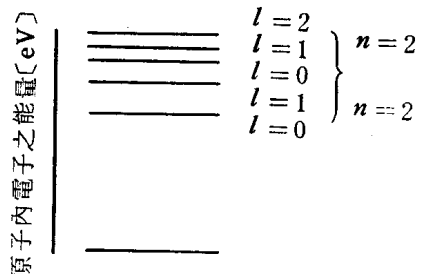


圖 2-3 能階圖(2)

(註2) n, l, m_L, m_s 分別稱爲主量子數，角量子數，磁量子數及旋量子數。

序來排列，便可知價電子數具有週期性，所以元素的物理性質、化學性質亦具有週期性。

一般而言，最外層軌道完全被電子佔滿之元素，有安定的化學性質，故很少能與其他元素化合，並且大多數為電的絕緣體。反之，最外層軌道帶有較少電子之元素，容易失去其少數之電子而形成陽離子，而最外層軌道差不多被電子所佔滿之元素，有吸收電子成為陰離子，以填滿其最外層軌道，便可趨於穩定。

(5) 激發與電離

原子內的電子，照苞立不共容原理，自內層軌道依次向外層層道配置，若此原子受外部適當能量的作用時，位於內層軌道之電子，便吸收其能量而向外層軌道跳升，甚至逸出原子之最外層軌道。前者稱為激發 (excitation) 後者稱為電離 (ionization)。(註3)

表 2-2 元素之電子排列

原子序	元 素		$n=1$	$n=2$		$n=3$		
			$l=0$	$l=0$	$l=1$	$l=0$	$l=1$	$l=2$
可 存 在	電 子 數		2	2	6	2	6	10
1	氫 (H)		1					
2	氦 (He)		2					
3	鋰 (Li)		2	1				
4	鈹 (Be)		2	2				
5	硼 (B)		2	2	1			
6	碳 (C)		2	2	2			
7	氮 (N)		2	2	3			
8	氧 (O)		2	2	4			
9	氟 (F)		2	2	5			

(註3) 激磁及電離所必要之能量分別叫做激發電壓、電離電壓，以 ev 表示

10	氖 (Ne)	2	2	6		
11	鈉 (Na)	2	2	6	1	
12	鎂 (Mg)	2	2	6	2	
13	鋁 (Al)	2	2	6	2	1
14	矽 (Si)	2	2	6	2	2
15	磷 (P)	2	2	6	2	3
16	硫 (S)	2	2	6	2	4
17	氯 (Cl)	2	2	6	2	5
18	氬 (Ar)	2	2	6	2	6

2-2 分子的構造 (鏈與其特性)

很多物質都是由幾個原子結合，以分子狀態而存在。這些原子間的結合情形或分子的大小、形狀，有下述各種情形。

(1) 離子鏈

如食鹽分子，當最外層帶有一個電子之鈉與最外層帶有七個電子之氯，相互接近時，鈉的最外層的一個電子向氯的最外層軌道移動，每一原子都欲在其最外層配成滿額之電子，以求其安定。此時鈉原子因失去一個負電荷，核內的正電荷則變成過剩而成為一價的陽離子，相反地氯原子即成為陰離子。如此電子移轉之結合方式稱為離子鏈 (ionic bond)。

(2) 共價鏈

三個氫原子結合成氫分子的情形，經過各種測驗的結果，因兩原子有均等的電子分配，所以兩原子間不產生靜電力作用。因此在這種情形之下，其原子間之結合，可認為是與離子結合方式不同之另一種原子結合方式。

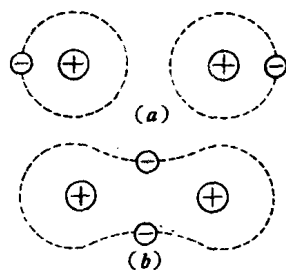


圖 2-4 氫分子之形成

如圖 2-4 (a) 所示，二個氫原子各自