



# 實用固體熱發光劑量 測定術

許彬杰 翁寶山 編著



合記圖書出版社 發行

# 實用固體熱發光 劑量測定術

許彬杰 翁寶山 編著



合記圖書出版社 發行

國家圖書館出版品預行編目資料

實用固體熱發光劑量測定術 / 許彬杰,翁寶山

編著. -- 初版. -- 臺北市 : 合記,

2002【民 91】

面 ; 公分

含索引

ISBN 957-666-869-7 (平裝)

1. 熱 — 輻射

335.75

91010058

書 名 實用固體熱發光劑量測定術  
編 著 許彬杰 翁寶山  
發 行 人 吳富章  
發 行 所 合記圖書出版社  
登 記 證 局版臺業字第 0698 號  
社 址 臺北市內湖區(114)安康路 322-2 號  
電 話 (02)27940168  
傳 真 (02)27924702

總 經 銷 合記書局  
北 醫 店 臺北市信義區(110)吳興街 249 號  
電 話 (02)27239404  
臺 大 店 臺北市中正區(100)羅斯福路四段 12 巷 7 號  
電 話 (02)23651544 (02)23671444  
榮 總 店 臺北市北投區(112)石牌路二段 120 號  
電 話 (02)28265375  
臺 中 店 臺中市北區(404)育德路 24 號  
電 話 (04)22030795 (04)22032317  
高 雄 店 高雄市三民區(807)北平一街 1 號  
電 話 (07)3226177

郵政劃撥 帳號 19197512 戶名 合記書局有限公司

西元 2002 年 6 月 10 日 初版一刷

## 作者簡介

### 許彬杰先生

許彬杰先生現任職於國立清華大學原子科學技術發展中心保健物理組技正。從事游離輻射防護外，並專研固體熱發光劑量計的研發與特性探討，及應用於游離輻射與紫外輻射劑量度量評估，凡 30 餘年。發表學術論文 150 餘篇，於著名國際期刊與國內期刊及國際學術會議，並與翁寶山教授合著游離輻射防護實務一書。民國 75 年與翁寶山教授、孫觀漢博士，共同榮獲中華民國中山學術文化基金會 75 年度中山技術發明獎；民國 77 年與民國 90 年，分別榮獲國立清華大學績優職技人員獎；民國 79 年榮獲為斐陶斐榮譽學會會員；民國 80 年與李四海教授，共同以新熱發光劑量計材質鎘錳活化硫酸鈣熱發光劑量計，獲經濟部中央標準局專利發明 15 年專利(發明第 55850 號)；民國 81 年榮獲教育部 81 年度大專院校技術人員傑出技術獎；民國 86 年與民國 89 年，分別榮獲行政院原子能委員會第四屆核能安全獎與第四屆放射性物料安全營運績優人員獎。

### 翁寶山先生

翁寶山先生美國德州農工大學核子工程博士。歷任國立清華大學副教授、教授、保健物理組主任、核子工程系系主任、以及原子科學研究所所長，著作等身，深受學界器重。於清華任教期間，曾先後至德國卡斯魯核能研究中心，沙烏地阿拉伯紹德國王大學、美國橡嶺國家實驗室、以及美國環境保護署所屬國家空氣與輻射環境實驗室等國外機構任教或研究。民國 86 年自清華大學退休後，轉任財團法人中華民國輻射防護協會執行長，並獲選為財團法人核能資訊中心董事長。

# 序

熱發光現象的發現約始於 100 年前，然後逐漸進入熱發光機制的探討，至 1940 年代已建立電子和電洞躍遷的動力學模型。熱發光的現象用於輻射劑量的測定起始於 1950 年代，到了 1960 年代則相當的成熟。除了輻射劑量的測定外，其用途並推廣至其它的領域。到了 1980 年代熱發光劑量計的應用，已經達到巔峰的狀態。

我國在 1967 年首次引用固體熱發光劑量計於游離輻射劑量度量，至今亦歷經約 40 年之久。在這段期間，各系列的固體熱發光磷質不斷地研發，且其對各類別游離輻射與紫外輻射反應的特性與劑量度量方法，亦不斷地作探討。熱發光劑量計目前已廣泛應用於放射治療與診斷的輻射劑量、環境輻射劑量、人員輻射劑量、考古學與地質年代測定、地震與斷層位置走向測定、鈾礦探勘、地下水文測定及紫外輻射能通量等度量與研究。

由於一套涵蓋熱發光磷質的晶體生長、輻射反應的理論分析方法、特性探討、劑量度量方法、以及應用等完整的固體熱發光劑量測定術專書，並不多見，且大多為英文版。作者有鑑於此，將固體熱發光劑量測定術在清華大學的 30 多年研究與應用心得，加以整理成書，以供有興趣探討固體熱發光劑量測定術的人士參考。本書部分內容曾作為清華大學原子科學系的講義，適合大專理工科系的程度。

在經歷四年的寫書期間，感謝資佳公司提供該公司代理各類型游離輻射劑量標定儀、熱發光劑量計計讀儀以及各系列固體熱發光磷質的相關基本資料，國立清華大學王主任秘書天戈教授、原子科學院江院長祥輝教授、原子科學技術發展中心鄧

主任希平教授與保健物理組趙組長君行博士的鼓勵與支持。另  
台電放射試驗室李課長明樹、林股長南旗，元培科學技術學院  
張榮華先生，同仁劉鴻鳴博士、葉麗如小姐與黎雪萍小姐，於  
百忙之中熱心協助提供資料與幫忙打字校對，謹致謝忱。

許彬杰 翁寶山謹識

民國 91 年 4 月 29 日於新竹清華園

# 目 錄

	頁
第一章 熱發光劑量計發展史 -----	1
1.1 熱發光的發現 -----	1
1.2 熱發光與輻射 -----	1
1.3 熱發光物質的種類 -----	2
1.4 熱發光劑量計 -----	6
1.4.1 理想的熱發光劑量計 -----	6
1.4.2 熱發光劑量計的形狀與結構 -----	7
1.5 熱發光劑量計在我國的研究與發展 -----	12
第二章 熱發光原理 -----	21
2.1 發光與熱發光 -----	21
2.2 晶格結構、缺陷與擴散 -----	27
2.2.1 晶格結構 -----	27
2.2.2 晶格缺陷 -----	28
2.2.3 晶格缺陷擴散 -----	32
2.3 晶格色中心 -----	33
2.4 熱發光模式 -----	35
2.4.1 晶格結構模式 -----	36
2.4.2 固態能帶模式 -----	36
第三章 輝光曲線的分析 -----	43

3.1 輝光曲線-----	43
3.2 熱發光的機率-----	44
3.3 一次動力學-----	46
3.4 二次動力學-----	49
3.5 一般次數動力學-----	50
3.6 零次動力學-----	52
3.7 厄迪羅維斯理論-----	53
3.8 輝光光峰分解法-----	55
3.9 陷阱深度參數計算法-----	56
3.9.1 基於溫度最大值法-----	56
3.9.2 起始上升法-----	57
3.9.3 面積測量法-----	64
3.9.4 不同加熱率法-----	69
3.9.5 等溫衰變法-----	73
3.9.6 反曲點法-----	77
3.9.7 數值曲線擬合法-----	79
3.9.8 輝光曲線形狀分析法-----	82
3.9.9 陳氏法-----	94
3.10 $s$ 與 $s^{-1}$ 對溫度的關係-----	103
第四章 熱發光磷質的晶體生長-----	109
4.1 晶體結構類別-----	109



4.2 晶體的生長-----	109
4.2.1 單晶體生長-----	109
4.2.2 多晶體生長-----	112
4.3 活化劑物質-----	115
4.3.1 錳活化劑物質-----	116
4.3.2 鎘活化劑物質-----	116
4.3.3 鈹活化劑物質-----	117
4.3.4 鎘、錳混合活化劑物質-----	120
4.4 活化劑物質含量-----	120
4.4.1 金屬性活化劑物質-----	120
4.4.2 非金屬性活化劑物質-----	123
4.5 雜質元素的影響-----	125
4.6 晶體的生長溫度-----	127
4.7 晶體的冷卻速度-----	128
4.8 晶體的輻射敏度分布-----	129
4.9 顆粒粒徑的輻射敏度-----	131
第五章 熱發光劑量計計測系統-----	133
5.1 熱發光計讀儀-----	133
5.2 熱發光計讀儀類別-----	134

5.2.1 加熱方式-----	134
5.2.2 計讀傳送與熱發光信號運算處理方式-----	141
5.2.3 加熱器的結構-----	142
5.3 熱發光計讀加熱模式-----	143
5.3.1 線性連續加熱-----	143
5.3.2 非線性連續加熱-----	144
5.3.3 階梯式加熱-----	144
5.4 熱發光信號檢拾系統-----	145
5.4.1 暗室-----	145
5.4.2 光信號檢拾器-----	146
5.4.3 光電倍增管雜訊-----	150
5.4.4 冷卻器-----	153
5.4.5 光電倍增管的信號輸出與工作電壓-----	156
5.5 加熱器的雜訊與消除-----	160
5.5.1 加熱元件的雜訊-----	160
5.5.2 加熱元件雜訊的消除-----	160
5.6 信訊處理與顯示-----	162
5.6.1 直流度量模式-----	163
5.6.2 光子計數模式-----	163

5.6.3 脈衝計數模式-----	164
第六章 熱發光劑量計的游離輻射反應特性(一) --	167
6.1 游離輻射的反應-----	167
6.2 共通性的反應-----	167
6.2.1 能量反應-----	168
6.2.2 劑量反應-----	170
6.2.3 加熱率反應-----	175
6.2.4 曝露率反應-----	178
6.2.5 入射角度反應-----	182
6.2.6 再生處理反應-----	189
6.2.7 消光反應-----	208
6.2.8 微劑量生長反應-----	222
6.2.9 再現性反應-----	229
6.2.10 熱發光磷質的計測重量-----	235
第七章 熱發光劑量計的游離輻射反應特性(二) --	239
7.1 特殊性的反應-----	239
7.2 輻射類別與能量的反應-----	239
7.2.1 同位素因素-----	239
7.2.2 活化劑因素-----	241

7.3 高溫再生處理反應 -----	257
7.4 氣體效應-----	265
7.4.1 計讀過程反應-----	265
7.4.2 照射過程反應-----	267
7.5 輻射照射環境溫度反應 -----	274
7.6 鐵氟龍介質反應 -----	279
7.7 紫外輻射反應-----	286
<b>第八章 熱發光劑量計的非游離輻射反應特性 ----</b>	<b>293</b>
8.1 非游離輻射反應 -----	293
8.2 光轉化熱發光機制正反應 -----	294
8.2.1 輝光曲線分布反應-----	296
8.2.2 固有敏度反應-----	296
8.2.3 紫外輻射能通量反應-----	297
8.3 光轉化熱發光機制負反應 -----	299
8.3.1 輝光曲線分布反應-----	299
8.3.2 固有敏度反應-----	300
8.3.3 紫外輻射能通量反應-----	302
8.4 高溫前處理反應 -----	304
8.4.1 輝光曲線分布與前處理溫度-----	304

8.4.2 固有敏度反應與前處理溫度-----	306
8.4.3 輝光曲線分布與高溫前處理時間-----	308
8.4.4 固有敏度反應與高溫前處理時間-----	309
8.4.5 固有敏度的再現性與高溫前處理次數-----	312
8.4.6 活化劑物質類別與高溫前處理-----	313
8.5 高溫前處理的氣體效應-----	318
8.5.1 氣體體積與前處理溫度-----	318
8.5.2 氣體類別與成份-----	321
8.6 雙重溫度前處理-----	324
8.6.1 輝光曲線分布反應-----	325
8.6.2 殘留熱發光輸出反應-----	326
8.6.3 紫外輻射波長反應-----	327
8.6.4 紫外輻射能通量反應-----	328
8.6.5 消光反應-----	329
第九章 熱發光劑量計的輻射敏度反應校正-----	333
9.1 輻射敏度反應-----	333
9.2 游離輻射敏度反應校正原則-----	333
9.2.1 輻射與物質的作用方式-----	333
9.2.2 輻射的射程與穿透能力-----	334

10.5.1 輻射類別鑑別 -----	383
10.5.2 輻射能量鑑別 -----	387
10.6 輻射劑量度量與應用 -----	392
10.6.1 環境輻射劑量度量 -----	393
10.6.2 人員體外輻射劑量度量 -----	403
10.6.3 醫用輻射劑量度量 -----	414
10.6.4 考古物與地質年代測定 -----	438
10.6.5 地震與斷層位置、走向的測定 -----	449
10.6.6 鈾礦探勘 -----	469
10.6.7 地下水文測定 -----	470
10.6.8 醫療用紫外輻射能通量測定 -----	474
10.7 未來的展望 -----	475
索引 -----	481

# 第一章 熱發光劑量計發展史

## 1.1 熱發光的發現

早在中世紀時代，從事煉金術的人士就發現某些礦物置於暗處加熱時，被加熱的礦物會產生微量的發光特性。根據1973年貝克(Becker)於固態劑量學一書所述：「直到1663年10月28日，波以耳(Robert Boyle)向倫敦皇家學會報告，他將金剛石礦物置於臥房的黑暗處加熱時，可觀察到金剛石礦物隱約的發出一種微光」。這是人類首次以科學的方式，描述記錄礦物的熱發光現象。隨後，還利用不同的熱源，如熱烙鐵、磨擦和蠟燭等方式，甚至以人體體表溫度來激發金剛石發光。1676年，厄爾叔茲(Elsholtz)也觀察到螢石礦物，亦具有類似的發光特性。這種將礦物藉加熱方式使其發光的現象，在早期被稱為熱直接轉換發光。

在1726年杜費(Du Fay)利用天然石英礦物進行實驗，他觀察到石英接受光源照射後，石英可以再次加熱激發熱發光，並指出熱僅是用來激發這種光，而不是產生光。隨後在1821年，叩勞(Calloud)亦觀察到把含奎寧的硫酸鹽，置於100至180°C溫度間加熱時，硫酸鹽會發出藍色光。另在1889年，赫雪爾(Alexander Hershel)將隕石置於暗處加熱時，觀察到損石會發出黃白色光。上述所觀察到的各種礦物加熱的熱發光現象，可稱為天然熱發光。

## 1.2 熱發光與輻射

第一次觀察物質的熱發光現象與輻射的關係，大概是在1895年，由魏德曼(Wiedemann)和史密特(Schmidt)兩位。他們在實驗室利用陰極射線照射樣品產生熱發光。1898年，特羅布里茲(Trowbridge)和伯本(Burban)兩位，將螢石礦物加熱產生熱

發光後，再利用 x 射線照射，亦可使其熱發光重現。上述這種熱發光產生方式，可稱為人工熱發光。

直到二十世紀初，物質的熱發光與輻射間的關係，才開始有系統的廣泛研究。在 1904 年，居里夫人(Marie Curie)在她的論著指出，螢石礦物經加熱後所產生的熱發光現象並不持久，但其經鐳(Ra)照射後，再經加熱便可使其熱發光特性再現。1905 年，摩斯(Morse)首先研究螢石礦物所發出熱發光的光譜圖。

隨後，在 1923 年，林得(Lind)和巴威耳(Bardwell)兩位，繼續利用鐳射源，進行激發各種寶石和透明礦物的光發射研究。1924 年，魏克(Wick)利用 x 射線和電子射束，對各種天然礦物和人工處理磷光物，如硫酸鈣( $\text{CaSO}_4$ )進行激發熱發光研究。此硫酸鈣物質也是第一種被探討作為熱發光的人工磷光物質，並發現可用錳(Mn)來活化硫酸鈣磷光物質，形成一錳活化硫酸鈣( $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ )的新人造熱發光磷質材料。從此，人們瞭解到錳元素為人造熱發光磷質材料中一種很好的活化劑。

1935 年，黎曼(Lyman)首次利用  $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$  熱發光磷質材料測量紫外輻射的量，他利用電火花所產生的光，照射  $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$  熱發光磷質材料。由  $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$  的熱發光亮度，推算電火花和熱發光磷質材料間，空氣的透明度。這是以熱發光磷質材料作為偵檢器，應用於劑量學中度量輻射量的最早例子。

### 1.3 熱發光物質的種類

無論是天然的或是人造的，能具有熱發光特性的物質種類很多，常見的熱發光物質如表 1-1 所示。在這些熱發光物質中，依其晶體的晶格結構與生長方式(詳見第四章熱發光磷質



的晶體生長)，可區分為單晶體結構如氟化鈣熱發光磷質，與多晶體結構如硫酸鈣熱發光磷質等兩大類。

表 1-1 熱發光物質種類

物質名稱	化學式	備註	物質名稱	化學式	備註
氧化鋁	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*b	酸硫鉀	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
氟化鋇	BaF <sub>2</sub>		硼酸鋰	Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	*a,b
鈦酸鋇	BaTiO <sub>3</sub>		氟化鋰	LiF	*a,b
氧化鈹	BeO	*b	氯化鋰	LiCl	
碳酸鈣	CaCO <sub>3</sub>		溴化鋰	LiBr	
氟化鈣	CaF <sub>2</sub>	*a,b	硼酸鎂	MgB <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	*a,b
硫酸鈣	CaSO <sub>4</sub>	*b	氧化鎂	MgO	
溴化銫	CsBr		矽酸鎂	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	*a,b
碘化銫	CsI		氟化鈉	NaF	
溴化鉀	KBr		氯化鈉	NaCl	
氯化鉀	KCl		溴化鈉	NaBr	
氟化鉀	KF		碘化鈉	NaI	
碘化鉀	KI		氧化矽	SiO <sub>2</sub>	
			硫化鋇	SrS	

註：\*：為已商業化的熱發光磷質

a：單晶體結構      b：多晶體結構

上述表 1-1 所述的各類天然或人造的熱發光磷質，對輻射的敏度反應，並不盡理想。因此，絕大多數的熱發光磷質其晶體均含有一種或一種以上的人工添加活化劑，以改善其對輻射的敏度反應。活化劑的添加，必須視熱發光磷質的晶體材料而異，有些活化劑對熱發光磷質的輻射敏度反應毫無助益，甚至造成其對輻射敏度猝熄的效應。這類的活化劑添加物，如鐵(Fe)和鎳(Ni)等。到目前為止，用以改善熱發光磷質對輻射敏度反應，而添加有益的活化劑物質，常見的主要有：鋰(Li)、鈉(Na)、鎂(Mg)、矽(Si)、磷(P)、鈦(Ti)、錳(Mn)、