

蘇聯大眾科學叢書

電子顯微鏡

Ю. М. 庫什尼爾著

蔣芝英 滕砥平譯

582
17

商務印書館

科學出版社

電子顯微鏡

林. 恩. 羅. 士. 著
陳. 克. 勤. 譯



目 次

引言.....	1
一 視角.....	2
二 透鏡怎樣幫助眼睛.....	3
三 顯微鏡的祕密.....	5
四 什麼是光的繞射.....	6
五 光學顯微鏡的鑑別力和有效放大力.....	8
六 電子.....	10
七 電子射線.....	11
八 不用透鏡的電子顯微鏡.....	14
九 靜電透鏡.....	15
十 磁力透鏡.....	19
十一 第一具帶透鏡的電子顯微鏡.....	26
十二 透射式電子顯微鏡.....	30
十三 電子顯微鏡的明視度為什麼有限度.....	35
十四 電子顯微鏡的應用.....	37
尾語.....	46

引言

有些儀器能够造成物體的放大像，放大鏡或火鏡就是其中最簡單的一種。

例如鐘錶工人利用放大鏡就能很清楚地看見鐘錶機件上極小的螺絲釘和小輪盤，因為這些小機件在他眼裏已經比原來放大十至二十倍了。

還有比較更複雜的放大儀器，能使我們看見更小的微粒，叫做“光學顯微鏡”。這類顯微鏡不是由一塊而是由幾塊放大鏡組成的，所以能把物體的像放大到兩千倍。醫生利用光學顯微鏡能看見各種疾病的病原體——微生物，物理學者利用光學顯微鏡能研究各種材料的構造。

不久以前，在1932年，又發明了新的放大儀器——“電子顯微鏡”。它所以叫做電子顯微鏡，是因為它不是利用光線而是利用電子的射線，也就是利用飛得很快的帶陰電的極小的顆粒——“電子”。

這種奇妙的新的儀器，它的放大力比最完善的光學顯微鏡還要強得多。我們藉着電子顯微鏡所能看到的微粒，比較藉着最強大的光學顯微鏡所能看到的，小到百分之一。科學家利用電子顯微鏡看見了人的、動物的和植物的危險疾病的極小的病原體，就是所謂“濾過性病毒”，又看見了一個個的巨型分子和許多其他的東西。電子顯微鏡給人揭開了當時蓋在不可見的世界上的幕：它幫助醫生和生物學家去尋找許多種病的病原體，並且勝利地向它們作鬥爭；它使物理學家和工程師們能够親眼看見在金屬的鍛鍊過程中，在機械的加工過程中，以及在別種技術處理過程中所起的重要變化；最後，在電子顯微鏡的幫助下，化學家

們將查出各種有機物質和無機物質構造上的秘密，將知道促進化學反應的所謂“催化劑”的作用，又將知道……。

電子顯微鏡的構造怎樣，它為什麼比光學顯微鏡更有效力，利用電子顯微鏡已經看見了些什麼；這就是本書所要簡要地講述的。

一 視角

火鏡和放大鏡作用的秘密在哪裏呢？為什麼靠它能使看不見的成為看得見的呢？

為了解答這個問題，必須知道人的眼睛的一個有趣的特性。

我們從遠處看任何物體，比方說看一個工廠的高大煙囪。即使煙囪離你很遠，你還是能看見這個煙囪是底部寬，頂部窄的。可是砌成煙囪的磚，你就看不見了：全部的煙囪好像是一個均勻的整體。現在向煙囪走近些，你離煙囪越近，你看見煙囪上細微東西的數量就越多。這裏，你顯然就能分清一塊一塊的磚。然而到離煙囪很近的時候，你就會發現那些在遠處好像是一樣的磚，事實上它們的大小也並不一樣，在它們表面上還羅列着許多抓傷的痕跡和裂縫。

現在請看圖1。在那上面畫着從觀察的物體——煙囪的兩頭射到你的瞳孔中心的光線。你所看的物體越大，也就是說物體離你越近，那麼光線彼此形成的角就越大。這個角就叫做“視角”。

看整個煙囪的視角，要比看煙囪的一塊磚的視角大得多，這是很明顯的。你越走近煙囪，看煙囪的視角就越大，這是可以理解的。反過來說，如果視角極小的話，人的眼睛就不可能辨別出物體上的細微部份。

大家都知道，如果視角比一分還小，那麼整個被觀察的物體對於一個視力正常的人就好像是一個小點子，那就是說眼睛不可能辨清這個

物體的細微部分。

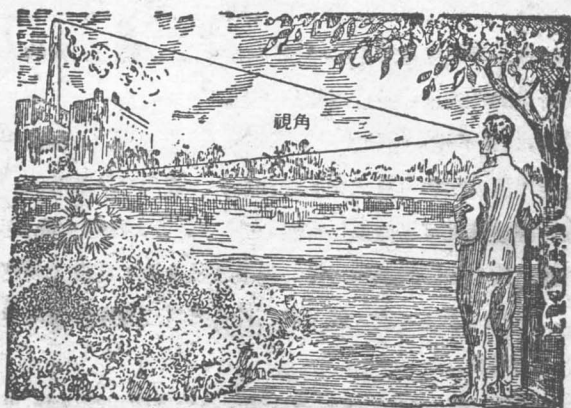


圖 1 從觀察物的兩頭射向瞳仁中心的兩條光線，形成所謂視角。

一分 的角度到底有多大呢？讓我們設想有兩個發光的小點，彼此相距 $\frac{1}{10}$ 毫米，又離眼睛 25 厘米。這兩個光點被看見的視角就是一分。只要把這兩個點子放在離眼睛 25 厘米以外，那時候視角就變得小於一分，而兩點也就分不清了。

由此可見，如果想儘可能地詳細觀察物體，必須放大視角。

怎樣才能放大視角呢？

二 透鏡怎樣幫助眼睛

在看工廠的煙囪的例子，你已經相信最簡單的放大視角的方法是走到物體近邊去看它。觀察不大的顆粒的時候也可以把顆粒移到眼睛眼前來。可是這種最簡單的放大視角的方法，有它自己的限度。誰都知道，即使是最近視的人也不把物體拿到眼皮底下來看。如果把物

體拿到離眼睛 25 厘米以內，正常人的眼睛就感覺疲乏，從 10 厘米開始就看不清楚了。用縮短距離的方法放大視角，只有在 25 厘米距離以外才能這樣做。25 厘米這個距離叫做“明視距離”。視力正常的人，在他讀書或看報的時候就保持着這樣的遠近。

然而，如果不能用物體移近眼睛的方法來特別有力地放大視角，那麼也許能用放大物體可見大小的辦法來放大視角吧？能夠的。利用放大鏡或所謂透鏡就可以做到；當然，它們不是放大物體本身，而是放大它們的像。放大物體的像的時候，光學透鏡就人工地放大我們看物體的視角。用這種方法，放大鏡使我們看見那些沒有透鏡幫助便看不出來的細小的東西。

像放大鏡、望遠鏡或是顯微鏡這類光學儀器作用的秘密，也包含在視角的放大裏。

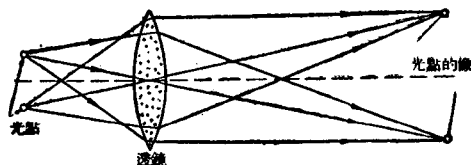


圖 2 雙凸透鏡中光線的進路。

圖 2，是表示最簡單的玻璃透鏡——雙凸透鏡的放大作用。這透鏡的兩面都是凸出的球面。爲了簡單起見，圖中只畫了物體兩頭的兩個點。你看，由物體每一點用發射性的光束放射出來的光線，在通過透鏡以後又重新聚合在一點上。然而在這裏，像上的兩個點彼此配置得比物體本身上的兩點更遠了，像的大小是比物體的大小更大了。因此我們看物像的視角，將大於從相同的距離看物體本身的視角。

現在就很明顯，放大鏡或者透鏡的作用是什麼了。

三 顯微鏡的祕密

圖3是光線在放大力比簡單放大鏡強大得多的最新式光學顯微鏡裏的進路。

顯微鏡裏面含有三塊透鏡。第一塊透鏡是爲了照明物體而預備的。它把從光源射來的光線匯聚起來，並使它們以最集中的光束的形態指向被觀察的物體，這塊透鏡叫做“聚光鏡”。顯微鏡的第二塊透鏡叫做“接物鏡”，接物鏡能把物像放大到50—100倍。對於很小的物體，這樣的放大力還不够，所以物鏡造成的像必須再放大倍數；顯微鏡的第三塊透鏡——“接目鏡”，就是爲這個目的而裝置的。

如果接物鏡放大物體到50倍，而接目鏡把像再放大20倍，那麼顯微鏡放大的總倍數就等於這兩次放大倍數的積數，也就是說顯微鏡將把物體放大到1000倍。在這樣的顯微鏡裏能夠看見大小等於0.00002厘米的微粒！這種微粒的像的大小將是0.02厘米。

顯微鏡替人類揭露了一個新奇的世界。各種不同職業的科學家——物理學家、生理學家、醫生，把顯微鏡的透鏡不斷地對着新的物體。我們將不詳述光學顯微鏡的歷史，祇說一說在前一世紀末尾，也就是說在顯微鏡發明之後的300年左右的時候，大家已經有了這樣的結論：即

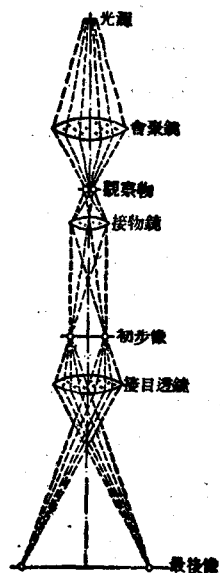


圖3 投影式光學顯微鏡中光線的進路。

在顯微鏡裏面不可能看見大小在 0.00002 厘米以下的微粒。乍看這個結論是可驚異的，因為我們知道每加一塊透鏡就可以使放大物像的效力增加一級，那麼如果兩塊透鏡放大力不夠，為什麼不拿三塊、四塊和更多的透鏡來用呢？為什麼不能用這種方法把不可見的世界的最終的秘密揭開呢？為什麼用這種方法不能看見用來製造所有物質的磚塊——原子和分子呢？

原來，光學顯微鏡所受的這種限制，不在於顯微鏡裏透鏡的數目和品質，而在於光的性質。

四 什麼是光的繞射

讓我們看廣闊水面上所起的微波。當波在進路上遇到任何一個障礙，譬如說，遇到高出水面的大石頭的時候，會發生什麼現象呢？當這塊石頭的大小比波長大許多倍的時候，也就是說比兩個相鄰的波峯或波谷間的距離大，我們將看見波碰到石頭就碎了；在石頭後邊的水面也是很平靜的。可以說石頭在它自己後面投下了一個它自己所特有的影子。

可是離石頭不遠的地方，栽着一根一直打入水底的細長樁子，樁子直徑的長比水的波長短得多，它不能阻止水波的傳播，於是它後面就沒有留下任何的影子。波一點不費事地繞過了木樁，好像沒有遇到樁子似的繼續地流下去。波的這種繞過障礙物的現象，叫做“繞射現象”。

在光的領域內也有繞射現象。因為光也是一種波；只是在光裏面振動的不是水的顆粒，而是電力和磁力；因此光波也叫做“電磁波”。

我們的所謂光線不是別的，只是電磁波傳播的方向。

光波的長度非常小。它們之中最長的是紅色光波，長度是 0.00008

厘米；最短的是紫色光波，長度是 0.00004 厘米。

也像在水面上的波一樣，光波的繞射現象祇在障礙物的大小和光波的長度差不多的時候才能看出。可是因為光波的長度十分小，因而對於光波來說，很小的顆粒都是大物體。所以當光照到微粒上的時候，微粒後面就會現出一個很清楚的影子。然而如果微粒越來越小，那麼光的繞射現象就越來越強大，微粒的影子也就越來越看不見了。

波的繞射現象的研究指出：當停在波的路上的物體的大小，大約等於波長的一半的時候，波就完全能繞行這個物體並不在後面留下任何可以看見的影子。

現在請回想一下，最短的可見光波是紫色光波，波長是 0.00004 厘米。這意思是說，光波完全能繞過大小在 0.00002 厘米以下的顆粒。在普通的顯微鏡裏，觀察這樣的顆粒，你不能發現它們的存在。誠然，有一種超顯微鏡是利用側面來的光線照明被觀察的微粒的，在它裏面能夠發現大小比光波長度的一半更小的顆粒（要明白側面照明的作用，可以舉一個例子，譬如：有一條明亮的太陽光線照進室內的時候，極小的微塵我們都能從光線的旁邊看見）。然而在超顯微鏡中我們雖然看得見顆粒，所看見的究竟只是些“光點”，至於它們的形式和構造，是不能清楚看到的。

這樣說來，任何一種光學顯微鏡，不論它有多少塊透鏡，只要它所用的是可見光線，那麼它就不能幫助我們研究大小在 0.00002 厘米以下的微粒的形狀和構造。這意思是說：在光學顯微鏡裏細菌是看得清楚的；可是最小的病原菌，所謂濾過性病毒就看不見了；至於細菌內部構造的一切細微項目和物質的最小微粒，當然也都看不見了。

五 光學顯微鏡的鑑別力和有效放大力

你已經相信，光的繞射作用可以限制我們不能看見我們所想要的微粒了。我們在顯微鏡裏能夠看見的最小微粒的大小，叫做顯微鏡的“鑑別距離”或者簡稱為“鑑別力”。鑑別距離越小，也就是在顯微鏡裏能看見的顆粒越小，那麼人們就說這顯微鏡的鑑別力越大。在最好的情況之下，前面已經說過，鑑別距離等於照明物體用的光線的波長的一半。可是這只在利用很好的透鏡的時候才能做到，如果透鏡不夠完善，那末，顯微鏡的鑑別力就要減小，它只能辨別比光線的波長大得多的顆粒。這現象是由於在不完善的透鏡裏，落在透鏡邊上的光線，交叉點離透鏡近，落在透鏡的中心部分的光線，交叉點離透鏡遠的緣故。這種現象叫做“球形像差”。這種現象的結果是使物體的像成為不清楚的：譬如一個放光的點被表現成爲一個漫散面（圖4）；任何物體都是由許多點組成的，因此，在像裏就有許多漫散面彼此重疊着。因之物體的像就不明晰，使鑑別力受到了損失。

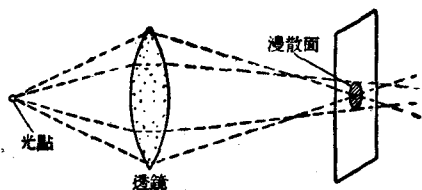


圖4 球形像差。

光點變成了漫散面，還有其他的原因。就是在不完善的透鏡裏，各種不同顏色的光線受到了不同的折射。這種現象叫做“色差”

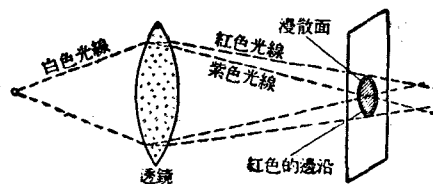


圖5 色差。

(圖5)。除去球形像差和色差以外，還有別種像差，可是關於這些，我們將不再詳述了。

光學家現在已經會製造沒有球形像差和色差的透鏡了。然而前面已經指出，就是在這種沒有球形像差和色差的透鏡裏依然不可能排除光的繞射作用。

根據上面所說的，我們可以知道為什麼提高顯微鏡的放大力，依然無益；為什麼儘管增加顯微鏡裏透鏡的數目，使物體的像放得更大些，還是不能辨明像裏的那些大小在鑑別距離以下的細微項目。

因此大家約定用所謂“有效放大力”來做評定顯微鏡的標準。在有效放大力之下，大小等於“鑑別距離”的顆粒，應當已經成為眼睛看得見的了。這就是說，顆粒的放大像應當等於0.2毫米。因為放在明視距離上的眼睛，對於0.2毫米的大小已經是能够清楚看見的。

因為在用可見光線來工作的最好的光學顯微鏡裏，鑑別距離等於0.00002厘米，所以它們的有效放大力不可能超過1000倍。事實上，把大小在0.00002厘米的顆粒放大到1,000倍的時候，你們所得到它的像，大小就是0.02厘米，或是0.2毫米。因此在光學顯微鏡放大1,000倍的時候，我們所能看見的東西，如果增多光學顯微鏡裏透鏡的數目，提高它的放大力到10,000倍，甚至100,000倍的時候，也一樣不能發現物體裏的任何新東西。像這樣的放大的唯一好處是在大的演講室裏應用起來方便，但是這祇能在畫面够亮的條件下，才有可能。

這樣看來，最完善、最有力的顯微鏡，也不可能幫助我們看見大小在照明物體的光的波長一半以下的小顆粒。

光線自己好像是在嚴密地守護着不可見的世界的秘密。所以要想揭開這個世界的秘密，必須用比可見光波還要短得多的波來把我們的

眼睛武裝起來。譬如：爲了觀察氫的分子，我們必須用波長比可見光波更短到幾千分之一的波。可是那裏去找這樣的波呢？

爲了這個目的，大家都想使用X射線，因爲它的波長比光波短到幾百分之一，甚至短到幾千分之一。然而X射線是有透射性的，沒有東西能够像玻璃透鏡折射光線一樣來折射它。既然沒有東西能做折射X射線的透鏡，當然也就極難製造利用X射線的顯微鏡了。

這樣看來，好像要深入瞭解不可見的世界的秘密，是永遠不可能實現的了。然而，在二十五年以前從誰都沒有想到的地方，却意外地來了一個幫手，這個幫手就是“電子”！

六 電子

這些帶陰電的最小的微粒——電子，怎樣能够代替光線呢？要知道光就是波，而電子却是 $1/10,000,000,000,000$ 厘米大的小微粒。這些小球的大小是原子的幾萬分之一。要明白用什麼方法不用波而用微粒

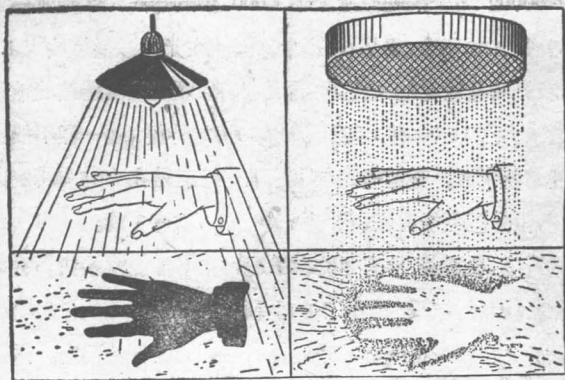


圖6 左方是利用光線而得到的陰影，右方是利用落沙而得到的陰影。

來照明物體，怎樣也能够得到物體的像，請看圖6。在這裏，圖的左方是利用光線得到的手的影像，圖的右方是利用從上面撒下的細沙得到的手的影像。也就是說，在這裏撒落的細沙代替了光線。

要把物體的形狀用微粒組成的射線來顯明，顯明得正確的唯一條件就是微粒的大小比物體的大小要小得多。舉例來說，不用細砂而用小石塊的話，手的影像就得不到了。

要得到極小物體的像，必須有合適的極細的小砂子，而電子正是這種小砂子。因為和電子比起來，最小的物質微粒如原子和分子，都還是很大的。

可是問題發生了：能不能得到強大的電子射線的射束呢？能不能看見電子和用電子射線照明的物體的影像呢？電子能不能被物體反射或穿過物體呢？還有，電子射線能不能像光線在透鏡裏那樣被折射呢？

現在我們就要開始答覆這些問題。

七 電子射線

從哪裏，從怎樣的來源可以取得電子呢？

一切元素的原子裏都含有電子，此外，在金屬裏面還有與原子沒有脫離關係的“自由電子”。可是有沒有方法使金屬內部的電子，從不自由的狀態裏釋放到外面去呢？有的。只要利用電流使金屬導線白熱化就行了。在這裏電子開始從導線的表面蒸發，向各方面飛散。舉例來說，在電流使電子管燈絲白熱化的時候，燈絲上正在發生這樣的電子蒸發。

物體在白熱化的時候放射電子的現象，叫做熱電發射。要獲得電子射線，也要利用導體因加熱而放射電子的方法。

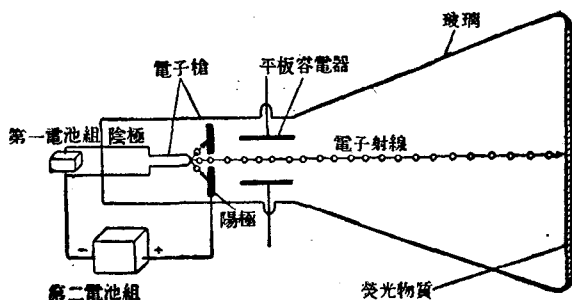


圖 7 電子射線管。

現在看圖 7，上面畫的是專為獲得電子射線有特殊裝置的管子，叫做“電子射線管”；管中的空氣已經被抽盡了。產生電子的來源是被第一電池組的電流燒熱了的細金屬燈絲。燈絲是用鎢做的，鎢是一種經得住高溫的金屬。燈絲白熱化的熱度越高，它發射的電子也就越多。電子從燈絲飛出以後落到一個有很強電力在裏面起作用的空間裏。這強大電力是由高壓電源——第二電池組造成的。電池組的陰極與白熱化的燈絲相連，這個燈絲因此就是電子射線管的陰極。電池的陽極是連在一個特別的屏上，屏的中央有一個孔，屏是鐳在管子上的，這個屏就是電子射線管的陽極。因為電子是陰電的顆粒，所以它們與燈絲——陰極相拒斥，和金屬板——陽極相吸引。這種產生電子的工具叫做“電子槍”。因為電子管裏的空氣已經被抽盡了，所以電子從陰極飛到陽極，一路上什麼也碰不到。好像從山上滾下來的球，滾到山脚就得了很大的速度一樣，電子到了電山的脚下——陽極，也就得到很大的速度。電子從上面滑下的電山越高，就是在陰極與陽極之間的電壓越高，那麼電子得到的速度也越大。

在電子射線管中的電子速度極大，譬如，只要用 4.5 伏特的電壓（也就是手電筒裏乾電池組的電壓）就足夠使電子加速，使它們有每秒 1260 公里的速度；如果以五萬伏特電壓來對電子起作用，那麼它們的速度將增大到不可想像的地步——每秒 124,000,000 公里。

爲了簡單起見，大家就公定如果有 1,000 伏特的電壓在驅策電子的時候，就說電子的速度是 1,000 伏特。

以高速落到屏或陽極上的電子，有什麼事情會發生呢？

其中有一部分落在陽極的密實的屏上，鑽進金屬的深處，並且與金屬屏中的電子相混合。

另一部分電子不和陽極屏相撞，却滑過其中的小孔。通過這個孔，電子將依着慣性就好像從山上滾下來的球，在平滑的表面上移動一樣，迅速飛過，直到和管底相撞的時候爲止。這個迅速飛過的電子流，就是電子的射束（在圖 7 裏面，可以看出，電子射線從陽極的孔走出，通過兩塊金屬屏，這兩塊金屬屏中間組成所謂平行板容電器；利用平行板容電器能夠變更電子射線的方向，關於這一點以後再要講）。

電子射到玻璃管的底部，就強迫底部放出紅綠色的光彩，這種光彩是飛行電子作用在玻璃原子中的電子上的結果；這樣的光彩被叫做“荧光”。有了荧光就可以清楚看見玻璃上眼睛看不見的電子落下的地方。但是有一些特別的物質如：硫化鋅或矽鋅礦在電子的作用之下發的荧光比玻璃還要好些。所以就把電子射線管底部塗上一層這些物質，這些物質在電子射擊下發着鮮明的綠色或藍色的光。荧光幕上光彩的亮度和電子的速度和每秒同時落在幕上的電子數量有密切的關係。這樣，根據幕上的光不僅能夠知道電子流落在那裏，並且能夠決定在什麼地方電子落得多些，在什麼地方電子落得少些。

八 不用透鏡的電子顯微鏡

現在你就很容易懂得怎樣利用電子來得到像的道理了。爲了實現這點起見，在構造和圖 7 相同的管子裏，在發散的電子射束的路上安放一個對電子射束不透明的障礙物，例如金屬製成的星。這時候就在熒光幕上得到星的輪廓顯明的陰影。把障礙物從電子的進路上拿開，陰影就消滅了。這樣，利用電子就能夠得到如圖 6 所表示的那種像。

這些像不單能夠看得見，而且還能夠照下來。只需把照像底片安放在熒光幕的所在，或者使電子有直接射到感光層上的機會就行了。這樣做的結果告訴我們電子射線也像光線一樣是能夠發生照像作用的。在照像底片上，那裏電子落得更多，那裏就更黑。

現在請看圖 8，上面畫着不用透鏡的電子顯微鏡。這個儀器使我們能夠看見放射電子射線的物體的放大像。在圖上放射電子射線的物體，就是一根細的金屬導線，它是順着圓形的玻璃管子的軸而裝設的。導線被電流白熱化了。在導線和管壁中間接上高壓電，管壁上面塗了薄薄的一層金屬，金屬層上面又塗有發熒光的物質。從導線飛出的電子落在玻璃管壁的熒光層上；在這裏，因爲導線的構造不同，從各段飛出電子的數量也不同。因此在熒光層上就得到了這根導線的像。電子好像是把導線的表面的像移到了熒光層上。

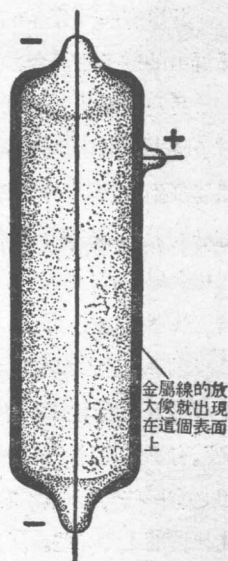


圖 8 不用透鏡的
電子顯微鏡。