

半 導 體 選 集

莊 蔚 華 等 譯

人 民 郵 電 出 版 社

目 錄

1. 半導體及其在技術中的作用.....A. Φ. 納飛 (1)
2. 半導體的基本原理.....H. 別寧 (7)
3. 晶體二極管作用的物理原理.....H. 別寧 (12)
4. 晶體三極管作用的物理原理.....H. 別寧 (21)
5. 半 導 體.....湯定元 (27)
6. 鍺二極管.....A. 普然及B. 高立堅別格 (39)
7. 點接觸式鍺二極管的典型電阻特性曲綫.....
.....A. 普然及B. 高立堅別格 (44)
8. 面接觸式鍺二極管A. 普然 (47)
9. 鍺二極管檢波器的輸入電阻.....A. 克尼亞節夫 (51)
10. 晶體三極管 (換阻器) 的幾種電路.....A. Γ. 姆拉強 (59)
11. 晶體三極管的應用.....H. 勃利以多 (67)
12. 晶體三極管低頻放大器 (一).....E. 蓋爾什仲及 (79)
13. 晶體三極管低頻放大器 (二).....H. 尼科拉耶夫斯基 (88)
14. 新式晶體三極管.....H. 勃利以多 (101)
15. 半導體三極管無綫電收音機Γ. 茨金 (107)
16. 超外差式晶體管收音機.....方乃正編輯 (115)
17. 晶體三極管視頻放 大 器.....E. 蓋爾什仲 (118)
18. 蘇聯晶體管的技術數據..... (124)

1. 半導體及其在技術中的作用

• 蘇聯社會主義勞動英雄、蘇聯科學院院士A.Φ. 約飛 •

莊蔚華譯自蘇聯真理報1955年11月14日，湯定元校

大約在25年前，物理學中發生了一系列具有重大意義的事件。第一次用人工方法實現了原子核的分裂。大約在同時，出現了第一個用半導體做成的交流電的整流器。這兩件大事對科學和技術的進一步發展起了決定性的影響。

已經公認：發展原子核學說的使命在於改造將來的動力工程和開辟新的掌握自然的道路。雖然半導體還沒有像原子核那樣廣泛地為人們所知道，但是，無疑地，它對於今後幾十年的技術具有重大的意義。

半導體的應用，已經在無線電技術和電子學中，在直流電工程中，在自動裝置和訊號設備中，在照明技術中，佔據了重要的地位。然而這僅僅是開始。最近將來的技術在相當大的程度上取決於現時的物理學。而在物理實驗室裏，已經在進行工作，以改變工廠中所習用的技術方法。

在更深入地研究半導體性能的基礎上，在實驗中，並且有一部分在實驗工廠中，已經用鉻和類似的半導體材料製造出整流器，它們的效率達到98%。這個成就推動了電工技術的發展，並且能促成遠距離輸送電能中的一些重要問題的解決。

1932年，第一次製成了氧化亞銅光電池，隨後製出了碲的

光電池，這些光電池不需要另外的能源就能在光照下產生電流。但在利用太陽能方面，這類光電池的效率不超過0.1%。還在偉大的衛國戰爭之前，蘇聯物理學家在這一方向上繼續進行的研究，就已經能做出和應用效率為1%的硫化鉍和硫化銀的光電池。目前已經能制成功率為10%左右的光電池了。

爲了對這個發現的意義有個概念，只要想一想下面的例子就夠了：太陽能的主要積蓄者——植物——在作爲燃料的時候，利用太陽能的效率只有1%。同時還要考慮到，光電池一開始就以最好的形式——以電能的形式給出能量，而從燃料的能量得到電能，還得借助於蒸汽鍋爐、蒸汽輪機和發電機。因此，在技術發展的現階段上，光電池已經比人類所用過的任何方法都有效。

自然，我們會關心到這樣一個問題：是什麼原因使半導體在所有其他材料中間佔有這樣優越的地位呢？

半導體這個名字的得來，是由於它是介於具有很大導電性的金屬和不導電的絕緣體之間的物質。在金屬中有自由電子載運電流；在絕緣體中，全部電子是被束縛住的；而在半導體中，電子被束縛的程度是如此之弱，以致熱、光和其他的作用都能釋放電子而增加導電性。

所謂熱敏電阻的作用就是基於這樣的性質，借助於熱敏電阻可以測量溫度和自動控制溫度。把幾千個熱敏電阻安置在船上的各個艙房裏，它們就能把船中的溫度報告調度室。蘇聯制的微型熱敏電阻只有幾分之一毫米大小，它們在生物學和農業

上找到有效的應用，如測量葉子和動物的溫度。

不僅加熱，就是光照也會減少半導體的電阻。另一類半導體儀器——光敏電阻就是根據這個性質製造出來的。光敏電阻可以感受到可見光和微弱加熱的物體所輻射的遠紅外線。光敏電阻的靈敏度是這樣大，以致借助於它能夠探測到幾十公里以外的熱的物體。

很早就知道，金屬和一系列半導體相接觸，會有這樣一種特性，在一個方向上電流能很好地傳導，而反方向却是導電不良。無線電愛好者利用這個現象，從無線電波中檢出一個方向的電流，使我們能在聽筒中聽到它。蘇聯物理學家O.B.洛謝夫甚至不僅做到利用再生式晶體接收機來接收無線電波，而且做到利用它來發送無線電波。

早在戰前，蘇聯物理學家就認為，而且用實驗確定了：整流不是像以前所認為的那樣，發生在半導體和金屬接觸的邊界上，而是發生在電流從一種類型的半導體通到另一種類型的半導體的時候。在戰時，這個事實重新在美國發現，並且利用在無線電測位和無線電技術上。從那時起，這個現象和發現有這個現象的物質——鍺和硅，就成為半導體和固體研究的中心問題。

利用半導體還可以從放射綫中得到能量，這樣做成的新的電源，類似原電池和蓄電池。假如選擇半衰期為2—3年的放射性元素，就可以得到足以供給無線電收音機用的電功率。

光電池和放射性電池還沒有走出物理實驗室。但是工業上已經出產了數以百萬計的半導體器件。

半導體的器件成功地代替着真空管。並且它具有能夠解決真空管技術所不能解決的一些問題的性能。它可以進行大量生產、體積小、壽命長，即使在很強的振動下也不會損壞，消耗能量小和其他一系列的優點，使半導體器件成為無線電技術中技術進步的體現者。

還在1832年，就知道了溫差電偶（溫差電池）。老早就發現，當它具有溫度差的時候，就會產生電流。從1834年起又發現當電流通過溫差電偶的時候，會產生溫度差。但是當時的溫差電偶是由金屬做成的，它的效應不大，對技術沒有什麼實用意義。溫差電偶只用來測量溫度。

在當時，談到作為電源的溫差電偶，似乎是夠天真的了。因為利用它來得到1千瓦的電力，需要消耗200千瓦的熱力。因此，在1929年，當我斷言利用半導體可以以2.5—4%的效率得到電能的時候，許多學者對這個推測就是懷疑的。然而真實性不僅終於證實了，並且顯著地超出了我的預期。現在對半導體溫差電偶在我國國民經濟中的遠大前途，已經是不會有疑問的了。正是半導體，而不是金屬，能夠實現動力工程的理想——不用機器而將熱能轉變成電能。

半導體理論使得溫差電偶或由任意數目的溫差電偶組成的溫差電堆（溫差電池組），可以進行充分的計算。當希望從電池得到高壓的時候，就可以串聯起來；而為了要產生強大的電流，就可以並聯起來。這種溫差電池組的效率達到6—8%。但這遠遠不是可能的限度。可以設想，在這方面將勝過效率為10%。

的現在的蒸汽機。

半導體溫差電偶的最初實際應用是利用煤油燈的“特格克—3”型精微發電機。在這裏，煤油燈點燃的時候產生的熱空氣，從玻璃罩內向上出來，烘熱溫差電偶的一個接頭，另一頭則由四周的空氣來冷卻。這種溫差發電機所產生的電能，足夠供給普通“祖國”牌無線電收音機的需要。在我國邊遠地區，“特格克—3”型發電機已經保證了無線電廣播的收聽。

幾萬個這樣的儀器使漁場、地質勘察隊、墾荒區的俱樂部，用來照明和無線電化。用煤油汽爐加熱的溫差電池組已經做出來供給農業機器站使用。

在遙遠的北方和邊遠的還沒有電氣化的地區，不僅應當保證無線電廣播的收聽，而且應當保證電燈照明和蓄電池充電。為此就需要幾百瓦的電功率。燃燒木柴、泥煤或任何本地燃料的不大的鐵爐子，可以利用溫差電偶給出需要的電能。或許不需要多久，就可以做出1千瓦到幾十千瓦的大功率溫差電池組。

這類溫差電發電器的效率暫時還不大，甚至比蒸汽機還小些。但是，不能不注意到溫差電池組是極簡單的。在這裏，既不需要蒸汽鍋爐，也不需要帶有運轉部分的機器，也不需要發電機。借助於它，可以把燃料的熱能直接轉變為電能。它使我們可以利用大量損失的廢熱。從煤、石油、木柴和泥煤燒出來的熱，大約有80%是散失在空氣中，沒有得到利用的。但是利用溫差電池組可以從這些廢熱中得到電能，例如把溫差電池組

放到中心暖氣裝置的鍋爐上去。這樣，我們就可以得到供給各個房間的居民日常生活需要而綽綽有餘的電能。

最簡單的會聚太陽光的鏡子，可以加熱溫差電池組而產生電能，這能量比樹木從葉子表面上所能得到的要大十倍。

溫差電偶也可以產生冷和熱。爲此，要使足夠大的電流通過溫差電池組。不管電流往那個方向，總有一個接頭失去熱量而變冷，另一個接頭得到熱量而變熱。改變電流的方向，就可以得到相反的結果。

用金屬做的溫差電偶的這個效應是不大的。1838年，楞次院士使電流經過接合的鉍棍和銻棍，能使放在接頭上凹處的小水滴凍結。金屬的溫差電偶可以降低幾度的溫度。用半導體則可以降低60度的溫度，而幾級串聯起來可以降低更多。根據這個原理，可以設計出家用冰箱。這類冰箱的壽命幾乎是無限期的，它所消耗的電能比“氣機”型冰箱來得省。

在現代技術中，特別是自動裝置、無線電技術和電子學中，有許多儀器只能在有限的溫度範圍內工作。而溫差電池可以在任意的外界溫度下保持所需的溫度。

擺在蘇聯物理學家面前的任務是：緊密地和工程師、化學家和冶金學家合作，迅速地、全面地發展半導體問題的研究，找出它的各種各樣的實際應用。這個任務是完全可以達到的，但是需要科學院的和地方的研究所、高等學校、高等工業學校、設計局、工廠實驗室和生產革新者的創造性勞動的結合。

（轉載自科學大眾）

2. 半導體的基本原理

蘇聯 H·別寧

半導體是比阻數值介於金屬和絕緣體之間的固體的統稱，半導體最突出的特徵是比阻受溫度的影響極大，而且是溫度升高，比阻減小，自然界中存在有許多不同種類的半導體，但是到現在為止，只有其中少數幾種能實際應用。

[鎢]是一種典型的具有半導體性質的元素，用鎢不僅製成了整流器和檢波器，而且還製成了晶體放大器——鎢三極管。用鎢三極管作為例子來說明電流在半導體中通過發生作用的情況最為恰當。因此，以下我們就討論鎢的性能。

鎢晶體的點陣結構

在鎢的結晶裏，各原子間有一種力量互相束縛。這種力量的發生可用氫分子的形成作為例子來加以解釋。

我們知道通常氫氣分子是由兩個氫原子所組成，這是因為氫原子含有一個帶正電的核——質子——和一個在一定軌道上環繞質子旋轉帶負電的電子。當兩個氫原子相互間距離極小時，兩原子的電荷間的相互作用就很大，影響電子環繞原子核的運動，並使兩個原子就互相束縛着成為一個整體。圖1表明這時兩個原子核和兩個電子的一種可能的分佈情形。在這種情況下，兩正原子核有互相推拒的力量，而對在公共軌道上旋轉的兩個電子又有吸引力量，因此成為穩定的平衡狀態。

兩個電子形成的電子束縛最穩定。從理論上可以證明，如果少掉一個電子，束縛力就減小；如果增加更多的電子，束縛力實際也不增大。

鎘晶體的形成，也靠了原子間的束縛力。鎘原子共含有32個電子，但其最外殼上只有四個電子。其餘的電子和原子核緊緊地束縛在一起，形成一個穩定的「原子根」，帶有4個正電荷。鎘的每個原子都極力要和另外四個原子形成相互束縛的關係。

圖2是鎘晶體點陣的結構。點陣中每個原子被距離相等的四個最鄰近的原子包圍着，每個原子所在的位置稱為結點。一塊晶體的每個結點上都有原子，既沒有空餘的結點，也沒有多餘的原子，稱為理想晶體。

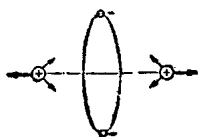


圖1 兩氫原子相互束縛
形成氫的分子

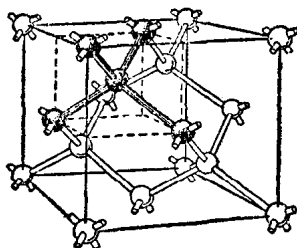


圖2 鎘晶體點陣結構

理想半導體的導電性

圖3用圖解方式表明一塊鎘晶體內原子相互束縛的點陣結構。兩原子間的束縛力用雙綫表示，每一條綫相當於一個電子起作用。每個原子和四個相鄰的原子的聯系，總共是八條綫，

即有八個電子起作用，四個電子是自己的，其餘四個各屬於一個相鄰的原子。這樣每個電子都牢牢地被束縛着，所以排列整齊的理想晶體是絕緣體。要使晶體起導電作用，必須先有若干不被束縛的自由電子。

熱的作用，可以幫助電子解除束縛。當晶體受熱溫度夠高時，某個電子可能獲得足夠的運動能量，可以克服兩原子對它的束縛力，結果，有一個電子解脫出來，形成一個帶正電的「空穴」，如（圖3, a），和一個自由的電子。

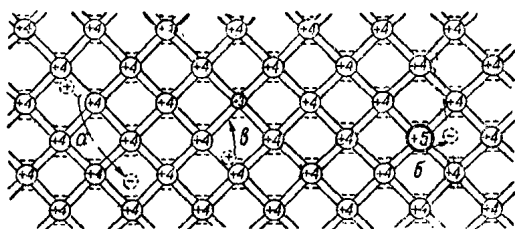


圖 3 鎢晶體點陣結構內的各原子相互束縛

a—由於束縛解除而形成了空穴和電子；b—點陣中的陰性雜質原子；c—點陣中的陽性雜質原子。

解放出來的電子，將在晶體內無秩序地動來動去，好像氣體中的分子一樣，如果給晶體加上一個電場，這些電子將順電力綫相反的方向運動，形成電流。

晶體內電荷轉移的另一種可能是由於空穴形成後，鄰近的一個在束縛中的電子在熱運動的作用下可能跳過去，把這空穴佔據。結果，一個空穴填滿了，在另一處又出現了一個新的「空穴」。「空穴」由一個原子轉移到另外一個原子。在外加電場的作用下，空穴的轉移將和電子運動的方向相反（圖4）。這

種導電性通常稱為空穴導電性，而電流就稱為空穴電流。空穴移動的方向和正電荷運動的方向相當。就像是有正電荷在運動一樣。

在理想晶體中當一些原子價束縛解除時，同時發生的自由電子和空穴數目相等，因之晶體的導電性也是同時由兩種電荷達成的。在任一溫度下，由於熱運動的結果，空穴和電子的生成和消失（重行結合）不斷地進行，單位時間內生成的空穴或電子的數目和因電子填入空穴而消失的空穴和電子數目是相等的。

含有其他物質的半導體的導電性

在鍺內摻入別種元素，可使晶體內自由電子的數目和空穴的數目不相等，這時的電流主要是由於一種電荷運動的結果。

摻入鍺內能使電子數目多於空穴數目的，稱為陰性雜質，鍺的陰性雜質中，有砷和銻。反之，使得空穴多於電子的，稱為陽性雜質。鍺的陽性雜質中有鎵和銨。

當其他物質的原子摻入鍺內以後，假定，晶體點陣內的某個鍺原子被一個砷原子代替（圖 3, 6），砷的原子外殼上有五個電子，其中四

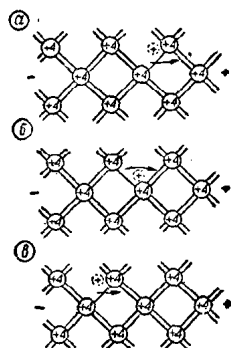


圖 4 空穴在電場中由一個原子轉移到另一個原子的過程的圖解：

a, b, c 表明電子轉移的各連續階段，圖中為簡化起見負電荷的符號一律略去，箭頭指明電子轉移的方向。

個和四個相鄰的鍺原子形成束縛關係，而第五個電子則 [多

餘下來。由於鎘的介電常數很大，這個電子和砷原子間的束縛力將變弱。並且，由於熱運動（甚至是在室溫下），它易於從砷原子中解脫出來。解脫出來的電子能參加導電，而砷的正離子則原位不動。所以砷在鎘裏起陰性雜質的作用，使得晶體內電子的數目多於空穴的數目，導電性將主要是電子導電性。

晶體內陰性雜質原子愈多，則電子數超過空穴數也愈多，由於電子和空穴重行結合數的增加，自由電子濃度的增加會使得空穴的濃度略為減小，在平衡狀態下電子密度 n 和空穴密度 p 間有下列關係：

$$np = 625 \times 10^{26} / \text{立方公分}$$

如前所述，理想晶體內電子密度和空穴密度是相等的，在電子導電性的鎘晶體內，電子密度大於空穴密度，例如，電子密度如為 $10^{16} / \text{立方公分}$ ，則空穴密度將約為 $6 \times 10^{26} \div 10^{16} = 6 \cdot 10^{10} / \text{立方公分}$ ，即約小10萬倍。

當在鎘晶體內摻有陽性雜質如銦時，就會發生空穴導電性，銦原子只有三個電子，因此，當一個鎘原子被一個銦原子代替時，點陣內和銦相鄰的四個鎘原子只有三個是被完完束縛的，而另一個鎘原子則少了一個電子束縛，即形成一個空穴，這個空穴很容易被某個從相鄰束縛中解脫出來的電子所佔據（見圖3.6），並在相鄰的一個原子內形成一個空穴。

這樣，摻入陽性雜質可使得晶體內空穴的數目，超過自由電子的數目，主要的導電性，將是空穴導電性。同時，和電子導電性中的情形一樣，空穴密度和電子密度間也有同樣的關係

式。

鎢晶體中，主要導電性是電子導電性的，稱為 n 型晶體，而主要導電性是空穴導電性的，則稱為 p 型晶體。

（鍾建安根據蘇聯〔無綫電〕1954年第8期H.別寧著〔半導體的基本原理〕一文編譯）

3. 晶體二極管作用的物理原理

蘇聯 H. 別 寧

任何一個晶體二極管裏都有一塊半電體的晶體，和兩個金屬電極。對於加在兩電極上的交流電壓會像普通二極管一樣，產生整流作用。本文就是談這種作用的原理。

電極和半導體的接觸，有兩種方式如圖1：第一種是點接觸式，用一電極和半導體接觸於一點，整流作用就發生在這一點附近，另一電極和半導體接觸於一個面上，沒有整流作用，只用來和外面迴路相聯接；第二種是面接觸式，兩電極和半導體的接觸都是面的接觸，半導體裏一部分摻入了陽性雜質，另一部分摻入陰性雜質，因此一部分是空穴導電性的，另一部分是電子導電性的，整流作用就發生在這兩部分的接界處，兩個電極都是為了對外面迴路相聯接。這接界處的附近範圍，我們叫做〔電子——空穴阻擋層〕。

這兩種接觸方式整流作用的物理過程，本質上是相同的。我們下面專談第二種方式整流作用的物理過程。

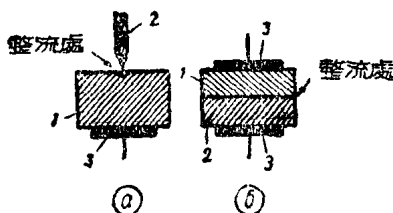


圖 1 a—點接觸式晶體二極管的結構圖：1—半導體晶體，2—第一電極——金屬尖端，3—第二電極；b—面接觸式晶體二極管的結構圖：1—晶體的電子區域，2—晶體的空穴區域，3—兩電極。

把陽性和陰性雜質摻入半導體的方法，常用的是雙面擴散法如圖 2。製造鍺二極管時，也用另外一種簡單的方法來形成「電子——空穴阻擋層」。就是先製成一片具有電子導電性的鍺晶體，把一小粒的銻放在鍺片的一個表面上，加熱到足夠的高溫（500—550°C）時，銻粒即鎔化成一滴液體，附在鍺的表面上並擴散到一定深度中去如圖 3。銻的鎔點是 156°C，鍺的鎔點是 958°C，所以鍺並不鎔化。冷卻以後，在銻滴附近的晶體片，有一層就有了很高的空穴導電性，和原來電子導電性的鍺晶體間就有了「電子——空穴阻擋層」。銻就成為這個空穴導電部分的接觸電極，另一電極可用鉛或錫焊在鍺片的下面，這樣可以獲得可靠的電接觸，但接觸面上並沒有整流作用。

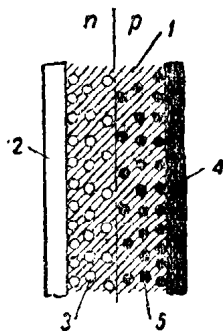


圖 2 用雙面擴散法形成電子——空穴阻擋層；1—銻；2—陰電性雜質金屬（例如鎘）；3—鎘的原子；4—陽電性雜質金屬（例如銻）；5—銻的原子。

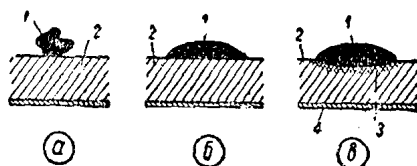


圖 3 用鎔合法形成電子——空穴阻擋層的各個步驟：a—鎔合前；b—起初，鋼鎔化成一滴液體附在鍺的表面上；c—溫度保持在 500°C — 550°C 若干時間以後。1—鋼；2—電子導電性的鍺；3—空穴導體性薄層；4—另一電極。

〔電子——空穴阻擋層〕中位壘的發生

在〔電子——空穴阻擋層〕裏自然形成的電位差，是這裏能產生整流作用的直接原因。我們先用圖 4 來分析一下這種接觸電位形成的原因。圖 4a 是含有雜質的兩種導電性質不同的晶體，圖 4b 和 c 是兩種雜質在晶體內的濃度分佈圖。左邊的一部分具有電子導電性，右邊的一部分具有空穴導電性。爲了簡單起見，我們假定每一部分中雜質的分佈都是均勻的。

圖中 b 和 c 分別是在熱平衡條件下（即無外電壓時）整個晶體內空穴濃度和電子濃度的分佈圖。

讓我們看平衡形成的過程。由於電子濃度在電子區域內比在空穴區域內大，於是，電子就力圖轉移（擴散）到空穴區域內去。電荷隨着一同轉移。如是，空穴區域就被負電荷充電，而電子區域則帶正電。同時，有電場發生，其方向是阻止電子轉移的，也就是說，這電場使電子區域的電位較空穴區域的電位爲正。由於電子擴散的結果，交界處的電場一直增大到使由電子區域轉移到空穴區域去的〔電子流〕最後等於零爲止。這樣

在電子區域和空穴區域間形成的電位差稱為接觸電位差。

這種現象和電子管整流管屏極上沒有接到外面迴路而聚有負電荷的情況類似。我們知道，陰極和屏極間即使不加電壓，電子也能由熾熱的陰極飛出。飛出的電子到達整流管的屏極上，結果，屏極被充電成負電位，而陰極則成正電位。在陰極和屏極間發生一電場，這電場阻止電子由陰極向陽極轉移。最後，電場一直增大到使所有飛出的電子一律折回，而電子由陰極向屏極的自發轉移也就終止了。

但是，在「電子——空穴阻擋層」中形成的平衡並不意味着電子停止運動。由於熱運動的結果，通過分界轉移到兩方去的電子的數目將相等。同時，能從電子區域進入空

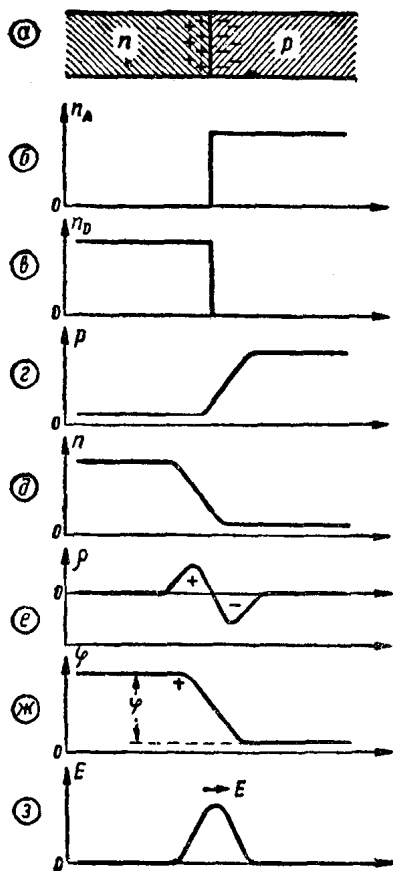


圖 4 陽電性雜質原子濃度 n_A ，陰電性雜質原子濃度 n_D ，空穴濃度 p ，電子濃度 n ，體電荷密度 ρ ，電位 ϕ 和電場強度 E 等的分佈。