



# 以傳輸線原理探討石墨烯 之固態物理特性

Study of the Solid-State Physical Properties of Graphene  
Using Transmission Line Theory

張志振

工研院機械所  
先進機械技術組

## 關鍵詞(Keywords)

- 石墨烯      graphene
- 傳輸線      transmission line
- 低通濾波器      low-pass filter

## 摘要(Abstract)

石墨烯為一新興之固態材料，其特殊之性質近年不斷為固態物理學所揭露。不需藉由經典之固態物理理論方法推演，以傳輸線原理探討石墨烯之基本特性，可以得到與固態物理所得之相同結果，而其物理意義則更為直觀。此方法將主題類比為傳輸線電路學問題予以探討，因此本文之主要篇幅即演繹此方法並詮釋其物理意義。

Graphene is a newly developed two-dimensional substance, of which more and more properties are disclosed by solid-state physics recently. In this article, a concept of transmission-line theory is introduced to analogize the properties of graphene, which gives a direct insight to understand its physical phenomena, instead of using complicated methodologies of solid-state physics.

## 1. 引言

石墨烯是由石墨塊材剝離的一層碳原子平面結構所組成，也是一個理想的二維晶格結構。每個碳原子的  $sp^2$  軌域(orbitals)中的三個電子與相臨的三個碳原子形成平面共價鍵結，稱為  $\sigma$  鍵，

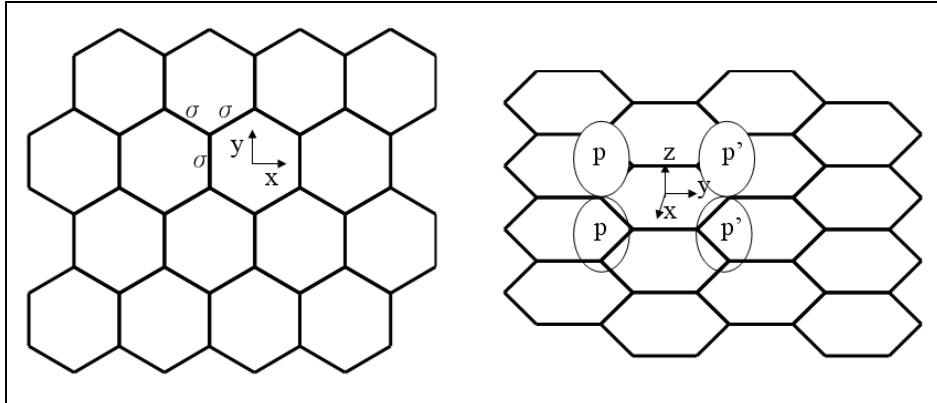


圖 1  
石墨烯之二維晶格結構

鍵角 120 度，故石墨烯二維晶格呈現正六邊形，另一個 p 軌域，狀似雙橢球，位於晶格平面(xy 平面)的上下兩側，其二維及三維視界結構如圖 1 所示。

如果只考慮相臨兩個 p 軌域(另一個 p 軌域記為 p')中的兩個電子，其狀態經由量子力學演算 [1]，可分為鍵結(bonding)態與反鍵結(antibonding)態。鍵結態能量較低而反鍵結態能量較高，故當兩個電子同處於鍵結態時能量較低而形成  $\pi$  鍵。此時兩個電子自旋方向必須相反以滿足泡立(W. Pauli, 1900-1958)不共容原理。電子依照此原理以最低能量方式填滿至最高能量狀態，所對應之能量為費米能量  $E_F$ ，在此情況下兩個 p 軌域的兩個電子填滿鍵結態而反鍵結態全空，為了兼顧電洞的物理特性通常定費米能量為鍵結態最高能量與反鍵結態最低能量的中間值，如圖 2 所示。其中兩個 p 軌域(p 與 p')仍以雙橢球體表示，繪製於碳原子平面之上下兩側，負號表示電子出現之機率極大值，正號表示極小值，虛線表示兩個 p 軌域電子之空間複合波函數之振幅，鍵結態為偶函數，反鍵結態為奇函數，箭號代表電子自旋方向。

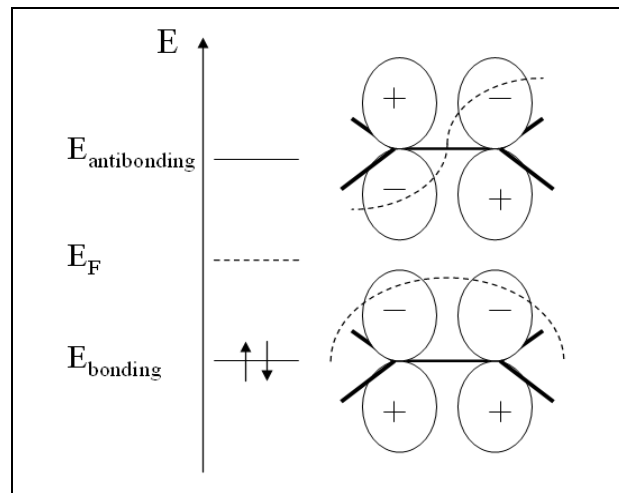


圖 2 石墨烯之鍵結態與反鍵結態與兩個 p 軌域示意圖[2]

將上述的原理應用在石墨烯二維晶格中，考慮一個碳原子僅與相臨的碳原子形成鍵結態，而一個碳原子與三個碳原子相臨，因此如果某個碳原子 p 軌域電子則與臨近的二個碳其中一個 p 軌域電子形成鍵結態。根據對稱性：石墨烯二維晶格以 z 軸旋轉一周具有三種對稱性(360 度= 120 度  $\times$  3)，以 xy 平面為鏡像平面又有兩種對稱性，於是其基礎態共有六重簡併(degenerate, 關於對稱性的一種描述)，如圖 3 所示。另一方面， $\pi$  鍵可以在晶格平面的三個對稱各方向上互易位置，任意方向又可以是此三方向的線性組合，因此直流

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】363期・102年6月號

每期220元・一年12期2200元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9342

傳真訂購：03-582-2011

機械工業雜誌官方網站：[www.automan.tw](http://www.automan.tw)