

科普新知 光子晶體

歷史簡介：

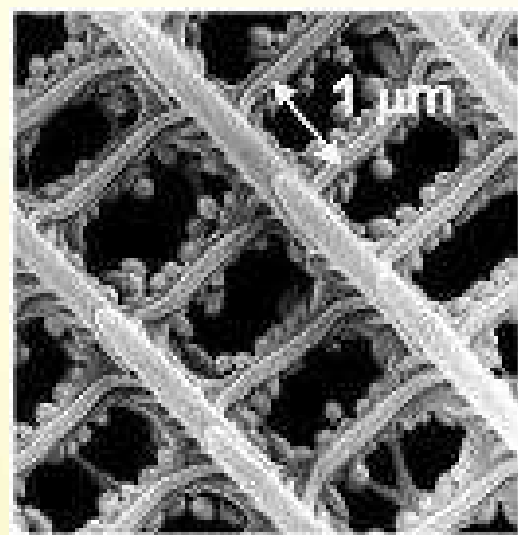
早在半個世紀前，物理學家就已經知道，晶體(如半導體)中的電子由於受到晶格的週期性位勢(periodic potential)散射，部份波段會因破壞性干涉而形成能隙，導致電子的色散關係呈帶狀分佈，此即眾所周知的電子能帶結構(electronic band structures)。然而直到西元1987年，E. Yablonovitch 及S. John才不約而同地指出，類似的現象也存在於光子系統中：在介電係數呈週期性排列的三維介電材料中，電磁波經介電函數散射後，某些波段的電磁波強度會因破壞性干涉而呈指數衰減，無法在系統內傳遞，相當於在頻譜上形成能隙，於是色散關係也具有帶狀結構，此即所謂的光子能帶結構(photonic band structures)。具有光子能帶結構的介電物質，就稱為光能隙系統(photonic band-gap system，簡稱PBG系統)，或簡稱光子晶體(photonic crystal)。

自然界中的例子：

光子晶體雖然是個新名詞，但自然界中早已存在擁有這種性質的物質，盛產於澳洲的寶石蛋白石即為一例。蛋白石是由二氧化矽奈米球(nano-sphere)沉積形成的礦物，其色彩繽紛的外觀與色素無關，而是因為它幾何結構上的週期性使它具有光子能帶結構，隨著能隙位置不同，反射光的顏色也跟著變化；換言之，是光能隙在玩變彩把戲。在生物界中，也不乏光子晶體的蹤影。以花間飛舞的蝴蝶為例，其翅膀上的斑斕色彩，其實是鱗粉上排列整齊的次微米結構，選擇性反射日光的結果。幾年前，科學家發現澳洲海老鼠的毛髮也具有六角晶格結構，為生物界的光子晶體又添一例。



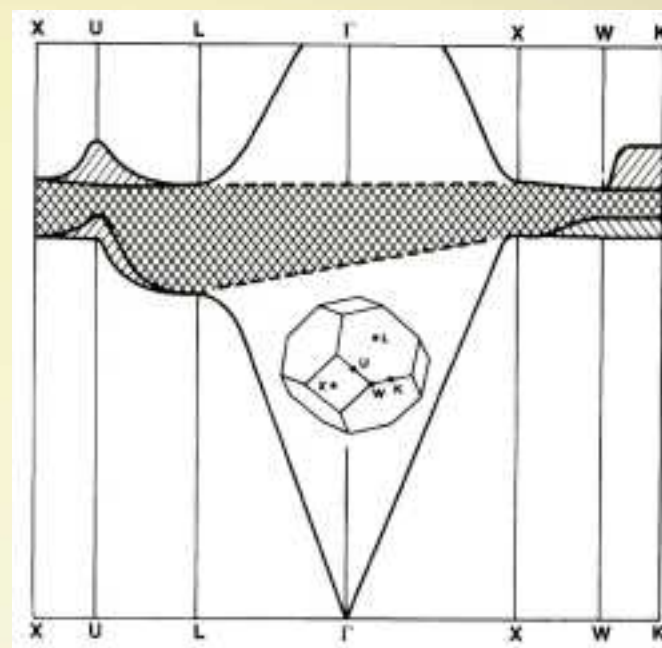
翅膀鱗粉具有光子晶體結構的蝴蝶



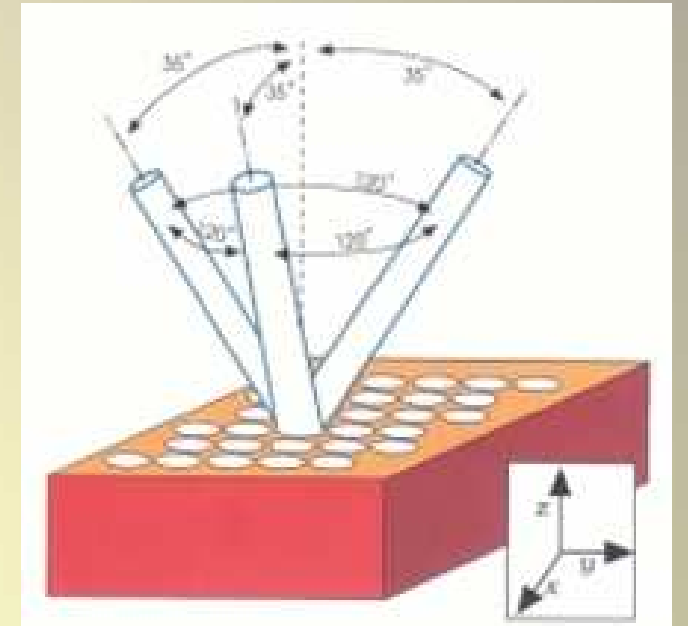
第一個絕對光能隙：

Yablonovitch及Gmitter在實驗中採用的週期性介電系統是在三氧化二鋁塊材中，按照面心立方(fcc)的排列方式鑽了近八千個球狀空洞，這些空洞即所謂的“原子”，形成一個人造的巨觀晶體。三氧化二鋁和空氣的介電常數分別為12.5和1.0，面心立方體的晶格常數是1.27公分。根據實驗量得的透射頻譜，所對應的三維能帶結構如右上左圖所示，其中左斜與右斜線分別代表兩種不同的偏極化模。由此圖所求得的絕對能隙位於15GHz的微波範圍，寬度約有1GHz。遺憾的是，理論學家稍後指出，上述系統因對稱性之故，在W和U兩個方向上並非真正沒有能態存在，只是該頻率範圍內的能

態數目相對較少，因此只具有虛能隙。兩年之後，Yablonovitch等人捲土重來，這回他們調整製作方式，在塊材上沿三個夾120度角的軸鑽洞，如此得到的fcc晶格含有非球形的“原子”(如下右圖所示)，終於打破了對稱的束縛，在微波波段獲得真正的絕對光能隙，證實該系統為一個光子絕緣體。



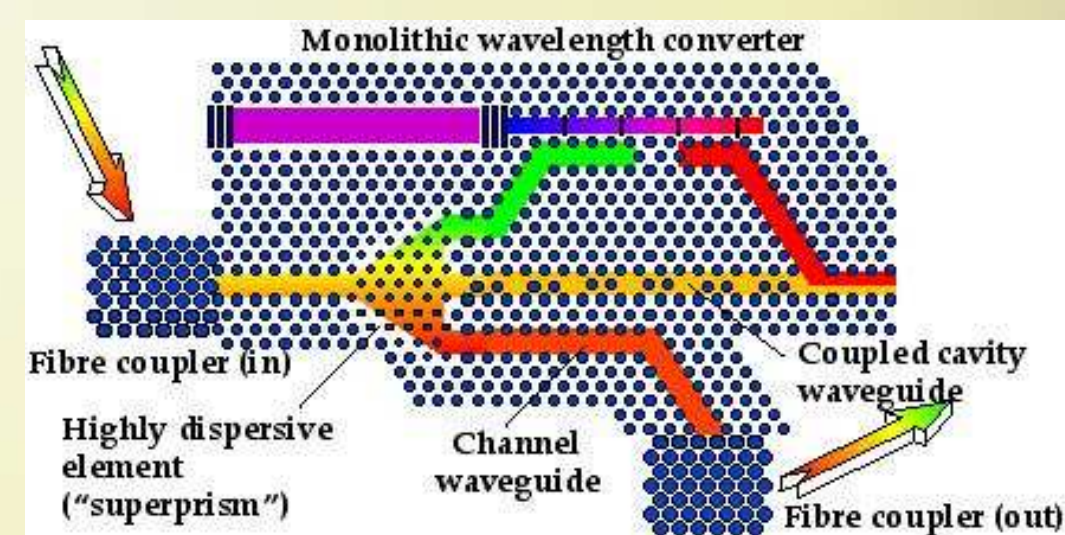
功敗垂成的三維光子晶體



第一個具有絕對能隙的光子晶體及其經過特別設計的製作方式

科技應用：

雖然只有完美的光子晶體才可能擁有絕對能隙，但就應用的角色來看，科學家對不完美的光子晶體更感興趣，原因就是雜質態。在二維或三維的光子晶體中加入或移去一些介電物質，便可以產生雜質或缺陷(defect)。這使原來為「禁區」的能隙出現了「一線生機」。能隙給了人類侷限電磁波的能力，而雜質所提供的一線生機則使我們有導引電磁波的可能，這點在光電上極具應用價值。因此，在光子晶體相關領域內，雜質態是個重要的研究課題。只要設計妥當，我們便可按照需求製造出具有特定能量或位於特定空間的雜質態，與半導體藉摻入雜質來調整載子性質非常相似，因此，光子晶體經常被比喻成未來光學界的“半導體”。



整合各種光子晶體相關結構之光電元件所設計的積體光路之想像圖

展望：

目前的半導體製程已經發展成熟至可以製做出奈米尺寸等級的光子晶體，關於光子晶體研究的結果及報告也不曾間斷過，如今其基本特性也逐一揭露在我們的面前。相信在不久的將來，會有更多令人拍案的設計以及令人激賞的成果出現在世人的面前，並成功製做出積體光路及以光來執行電腦二進位運算的光子電腦等應用。

參考文獻：奈米科學網

撰稿：李柏璵 製作：王超駿、林威廷、陳巍方