

奈米物理研究：奈米線，週期釘扎及光子晶體

計畫主持人：楊宗哲

新竹市國立交通大學電子物理系

國科會計畫：

92/08/01~93/07/31

93/08/01~94/07/31

94/08/01~95/07/31

年度報告

中文摘要

在光子晶體方面，建立能帶理論的觀點以掌控光子晶體完全能隙的設計，並擴展到提供解決光子晶體色散工程問題的方案。另外，提出光子晶體的波導與通常波導接合的高效率優化設計及近場光學顯微儀探針的新奇設計，提高通光效率。在超導方面，提出在鈮薄膜上刻畫出階梯式分佈的缺陷陣列，以低頻週期振盪的交流電流驅動渦旋運動，得到單向運動的現象，並在提高交流電流的振幅下，可得到渦旋雙向運動的現象。

關鍵詞：能帶理論、色散工程、完全能隙、探針、通光效率、鈮薄膜、渦旋、單向運動

英文摘要

In the photonic crystal, the point of view of band structure has been established to understand the cause of complete photonic band gap for two dimensional photonic crystal. Also, the dispersion engineering is pushed toward a new level using band structure view point. On the other hand, an optimum design for promoting high efficiency of jointing photonic crystal waveguide and conventional wave guide is proposed. A novel design of probe tip of near field optic microscopy is also proposed to increase the efficiency of passthrough. In the superconductors, the study of vortex dynamics in graded array of defects on a niobium film has been carried out and found a fascinating phenomena ratch effect.

Key words: band structure, dispersion engineering, complete photonic bandgap, probe tip, efficiency of passthrough, Nb film, Vortex, ratch effect.

一、緣由與目的

在計畫執行的三年裡我們原先規劃要進行的課題，尤其光子晶體方面受到突飛猛進的發展，使我們的研發方向受到修正。在超導渦漩問題上，由於我們持續地走在該領域的前緣我們不斷地製造出新的缺陷結構的 Nb 薄膜量得與理論預測相符合的結果，得到同行的肯定，邀請我們與之合作。同樣地理論的開拓者們，亦尋求我們做出他們預期的結果。在我們的未來計畫中，我們也能開始進行理論的模擬工作，此部分的成果已發表於今年的 solid state communication 期刊上。

自 1987 年光子晶體 (PC) 的新領域出現之後，光子晶體能隙的運用及開發受到人們的注意。近幾年又發展成光子晶體色散工程，將光子晶體的應用推向新的方向例如：超稜鏡效應，光脈沖形狀改變及壓縮。又如群速度和相速度 (phase velocity) 的概念，也廣泛地用於 PC 基底的元件。另一個是用於電磁波的 meta materials 的開發，它是由不同組成基元 (其大小遠小於波長) 組成的人工材料。在次波長尺寸的這種結構對整個 meta material 的有效不同介電常數 ϵ 和 permeability μ 得出新的特性。有一陣子著重於 meta materials 是負折射，即同時 ϵ 及 μ 出現負值。於是好多新的有趣現象被預測，且部分被實驗印證為真。然而 $\epsilon < 0$ 是金屬之本性，所以可把它引入 meta material 裡，而 $\mu < 0$ 卻必須利用共振引入，結果 $\mu < 0$ 僅能在充分接近共振出現，即出現 $\mu < 0$ 之頻率範圍窄。進一步要把 meta material 尺寸降下來就遇到瓶頸。

於是人們近來轉向不定性材料，即單軸異向性的人工材料 (meta material) 上，此處 μ 是純量及 $\mu > 0$ ，且 ϵ 的二個主值是異號。它呈現許多有趣的性質。這是我們去年的成果，而在今年 APL 上即將刊登。

除了上面提到那些新發展外目前人們的注意力轉向 plasmonic 領域，在今年三月的 Scientific America 刊登一篇介紹 Plasmonic 的新發展方向，以顯眼的字 nanolight 提醒人們，plasmonic 是未來量子計算機，奈米光，奈米光元件的希望。因此，我們未來的三年研究計畫是朝此一方向前進，這也是我想實現磷光或螢光的照明光源的可能路徑之一

本三年計畫中，針對光纖探針的優化設計，光子晶體完全能隙設計的線索，平坦色散曲線的獲得等等取得很有意義的成果。尤其建立能帶理論觀點探討光子晶體的特性和

規律，有助於開發新光子晶體的元件和新現象。

主於超導渦漩部分，我們以建構非對稱性 antidot 缺陷於 Nb 薄膜，在通以 ac 電流及均勻磁場(垂直於 Nb 薄膜)，取得 ratchet 效應，並且在製成六方晶格或 Comb 晶格的 antidot array 於 Nb 薄膜上，外加 Dc 電流及垂直於薄膜方向上加上一均勻磁場可得到匹配場，此一結果引起理論學者加以模擬及以 Ginzburg-Landau 理論獲致一致的解釋。底下，將就這些結果，簡要描述。詳細結果可參考所發表的論文。

二、 成果簡介

A. 光子晶体部份

在此三年期計畫中，我們完成諸多成果，其中我們發展改進型的平面波法，將通常的平面法推廣到可處理介電常數及磁化率會隨頻率的情形，而且可直接計算等頻率曲線。另外，我們的研究成果，申請到中華民國專利二件。一為波導元件，另一為次波長解析度的近場探針。底下將簡略介紹三年來所完成的重要研究成果。

1. 改進型的平面波法 (Solid State Commu. 129, 475(2004)及 Phys. Rev.

E70, 16706(2004))，把 K.M. Ho et al (PRL 65, 3152(1990)) 提出的平面波方法作稍微的變更表達式，使 TM 波的頻率本徵值的方程式變成波數為本徵值的方程式。如此不但可得到等頻曲線圖 (二維光子晶体)，而且相應的本徵函數可作為入射平面波於二維光子晶体界面時，晶体中，的傳播波的基函數。

又由於本方法可處理 $\epsilon(\omega)$ 及 $\mu(\omega)$ 的問題，因此改進後的平面波法，提升原來 Ho 等人所提的平面波法的功能。我們已將此方法應用於處理 Indefinite Media 的問題，得到 50/50 Beam Splitter 的現象。(即將發表於 Applied Physics Letters)

2. 光子晶体波導(Applied Optics 43, 6656(2004; Jap. J. Appl. Phys. 43. L1064(2004; Optics Commu. 253, 308(2005))

在光子晶体波導方面，我們作了三樣成果，其中之一申請到台灣專利。今將

分別簡述如下：

(a) Silica 波導與平面型光之晶体波導相互耦合高效率的設計 (Applied Optics 43, 6656(2004))。

在平面型光晶体波導的二個開口端，分別設置 Two-step-size tapered 結構。當中分別各放一個相同大小的缺陷柱。在以 FDTD 方法模擬的結果，呈現在波長 $1.55 \mu\text{m}$ ，穿透的功率可超過 90%，而且調整缺陷結構，可改變光通訊的中央頻率。另外，發現調變圓柱缺陷半徑，可使平面型光子晶体波導作成很好的反射器。

(b) 承(a)的部份，我們改變 Two-step-size tapered 結構成 Cabin-side-like tapered 結構，可使功率穿透效率提升到 90%。比起(a)的結構本結構的 Taper 較短，且易於製作，若在不要高精度製作的話，其耦合效率仍可達到 80% 以上，故可降低製作成本。相信本設計可用於積體光路上。(Jap. J. Appl. Phys. 43. L1064(2004))。

(c) 平面型異質結構光子晶体波導與 Silica 波導間的耦合效率的設計 (Optics Common. 253, 308(2005))，我們採用的平面型異質結構光子晶体是將二個二維光子晶体接在一起，此二個二維光子晶体彼此間只是具不同的填充因子。在二者界面上，波被局限，並沿界面傳播，我們在界面沿線的二端分別在二個半無窮大的光子晶体上各拿掉四根柱子。然後把異質界面稍微分隔，發現適當分隔下，可得到最大穿透率超過 90% (在波長接近 $1.65 \mu\text{m}$)。若只要求 80% 穿透率的話，在二異質界面相隔 $1.44a$ (a 為四方晶格常數)，其工作波長範圍可變寬 ($1.58 \mu\text{m} \sim 1.67 \mu\text{m}$)。

3. 二維光子晶體完全能隙 (solid stat. commu. 140, 144 (2006))，以四方晶介電柱子形成二維光子晶體，想使它的完全能隙增大，我們在每根四方柱的每邊中點處，分別垂直接上細的長方柱向外慢慢地延伸至相互接觸，觀察何時完全能隙達到最大值。此時，細長方柱長度近乎達到形成封閉網格，其原因是由細長方柱的 Mie 散射效應及電磁波的干涉造成。此一結果提供設計二維光子晶體完全能隙的新的思考方向。進一步，改變長方柱的介電常數大於或小於四方柱的介電常數，重複計算完全能隙隨長方柱長度的變化而變化的規律，此一結果，我們以能帶結構的能帶寬度及能帶中心的觀點作出合理的解釋，並將發表於今年的 Physics Letters 上。

4. 近場光纖探針的最佳設計

(Jap. J. of Appl. Physics, 43, 8115(2004).) R.G. Reddick 等人於 1989 年製成全反射的消散場的光學掃描穿隧顯微儀，其空間解晰度達 50nm~200nm，由於運用光學全反射的消散場作光源，無法獲致較佳的通光效率及較小的光斑尺寸，因而導致樣品無法獲足夠的光學強度，致使近場掃描光學顯微儀無法取得高空間解晰度之樣品表面形貌影像。

我們提出一種改良式近場光纖探針，可使近場光學顯微儀取得高空間解晰度的樣品表面形貌與近場光學影像。我們設計的探針尖端鍍上鋁膜或金屬膜以達到避免探針尖端的錐形側面洩露出而形成遠場光，如此可讓近場光及產生於材質表面且呈指數衰減的消散場能夠局域於光纖探針的尖端內部處，但為避免送光或收光之通光效率之被所鍍的金屬膜所限制，把探針頭部分作局部裸露，以便獲得良好的通光效率。

我們最後以 FDTD(Finite Difference Time Domain)方法計算次波長 aperture 及 fiber probe 的近場分佈。材料的色散也考慮進去，且探針不同型的三度空間探針用以照明光敏樣品，而得出最佳設計的探針。

B. 超導部份

棘輪效應(Ratchet effect)經常是發生在作布朗運動時的粒子處在不對稱的位能時的整流運動。這個課題廣泛運用於生物體內，例如細胞的運動、與細胞傳播養分和廢物。磁通渦旋在超導內運動也是有類似的結果產生。Vicent et al. 在 2003 年 science 雜誌發表了一篇文章[1-2]，在超導內製作缺陷形狀為三角形，讓缺陷的形狀為不對稱，當輸入交流的電流後則在電表上測得非零值。一般來說在交流的電流下所量測其直流的電壓，其直流的電壓應該為 0。這表示在交流的電流下，磁通會傾向往一邊流動。Moshchalkov 研究群[3-5]則是利用大小不同的缺陷排列成四方陣列也證實了磁通渦旋的整流。我們對於磁通整流相關研究的探討，則不採取周期性的有序陣列，而將缺陷排成不同疏密的排列[6-8]。在實驗中，對於樣品的設計為其缺陷的間距在 X 軸方向為等間隔，但在 Y 軸方向時，缺陷的間距為有一梯度，間距的大小從上到下為 392nm 遞增到 408nm，缺陷總共有 75 列，所以每列缺陷間距在 Y 軸方向遞增 0.22nm，包含整個缺陷的範圍為 $50 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ，整個樣品的缺陷密度在 X 軸方向的缺陷密

度是固定的，在 Y 軸方向以變化率為 $\Delta n_p / n_p = 7.96\%$ 慢慢的增加。其中 Δn_p 為最上列與最下列的密度差； n_p 為平均的缺陷密度。雖然樣品的缺陷密度存在一個梯度，但整體的缺陷密度與邊長為 400nm 的三角形陣列是一樣的，所以預期樣品會有與三角形陣列相近的匹配磁場值 150 Oe。

在外加均勻磁場垂直於薄膜表面，並外加電流於 x 方向下，得到驅動力的方向是沿著為具有梯度的 y 方向。今對於外加電流於+x 和-x 方向，量得電阻與外加磁場的關係曲線應可發現，結果與三角形陣列所得到的結果都具有相同的電阻值、相同的臨界溫度和相同的匹配場，除了在匹配磁場的附近的電阻值是相異外。又可發現在正電流方向的電阻值會比負電流方向的電阻大。此結果在樣品同樣可由直流電壓降(V)與外加電流(I)的關係曲線圖來互相驗證。若從 I-V 圖形的數據，在外加磁場及外加+x 和-x 兩個不同方向的電流，所量得直流電壓降與外加電流的關係比較，我們可以看到磁場在第一匹配場的電阻會比磁場在非匹配場時來的低，這表示在匹配場時在此缺陷陣列仍對磁通有支配性的影響使磁通能有效地被釘扎在缺陷中。另外，若將 I-V 曲線中正負電流造成的電壓降相比較，也看到在匹配場時正電流的電壓降也都比負電流來的高，這都表示在正電流時磁通的受力比較大；然而在非匹配場時(如 120 Oe)，正負電壓值為一致的曲線，此時磁通為非穩定平衡，因而受相同羅倫茲力作用的，流動的速度是一樣的。

若將外加電流設為頻率為 1kHz 的交流電流，會讓磁通感受到方向交替的交流羅倫茲力，而此交流羅倫茲力對於一周期的平均力為零 $\langle F=0 \rangle$ 。我們有探討三角形陣列在沒有外加直流電流時，對外加交流電流的情形下，磁通正負平周期內所消耗的能量是相同的，也就是說平均而言，所量到的直流電壓值為零。若外加上交流的電流來量測具有梯度排列的樣品的直流訊號則可發現有個很大的非零的電壓值，顯示此時磁通線被“整流”了。

第一，缺陷陣列的幾何形狀對於磁通運動是有相當密切關係。從以前的許多實驗結果都有呈現一件事實，不管缺陷陣列的形狀是正方形、正三角形、長方形、甚至是蜂窩的形狀，當磁通個數密度與缺陷密度之比為有理數倍數時就會有匹配效應的產生。本樣品因缺陷有存在小的梯度，這個小量的梯度就好像

是對正三角形缺陷的排列作小量偏移，所以當達到匹配場時磁通線釘住在缺陷中是屬穩定平衡，所以本樣品就如同正三角形的匹配場一樣。但是若是使缺陷排列的梯度增加到相當大時，這樣的支配性就可能不具存在，原因是磁通晶格無法穩固存在於這樣的排列裡。這就說明匹配效應的產生是著重在於陣列的對稱性。

第二，本樣品在匹配場時，缺陷的梯度造成樣品在匹配場下在 Y 軸的磁通密度是不相同的，因此磁通受到鄰近的磁通所提供的排斥力的淨合力沿著低密度的方向。而當磁通從缺陷密度較高流向缺陷密度較小時，則是會比缺陷密度較低流向較高來的容易，因此在磁場沿著+Z 方向時，正電流產生的驅動力所造成磁通的流動會較快，在 RH 和 IV 數據上很明顯可以看到正電流的電阻值較大。這就是說明在電流的方向的電阻差異產生是在於陣列的不對稱性。

若將直流電流改為頻率為 1kHz 的交流電流，會讓磁通感受到方向交替的交流羅倫茲力，而此交流羅倫茲力對於一周期的平均力為零 $\langle F=0 \rangle$ 。在子題七，我們有探討三角形陣列在沒有外加直流電流時，對外加交流電流的情形下，磁通正負平周期內所消耗的能量是相同的，也就是說平均而言，所量到的直流電壓值為零；然而對本子題所討論的樣品有小梯度的樣品而言，明顯存在一個非零的電位降。目前為止我們已有在直流曲線下的 IV 曲線圖，而在曲線的正負電流造成的電壓其值大小在匹配磁場時有明顯的不同，所呈現的就是磁通有個傾向是想從高磁通密度的方向往低磁通密度的方向移動。這個很明顯告訴我們此樣品對於釘扎位能分布是有不對稱性的，使得磁通的流動對方向具有選擇性。

三、 結論及未來發展

在光子晶體方面，以能帶理論觀點，可掌握和了解光子晶體完全能隙形成的規律，並進而推展光子晶體色散工程。另外，以光子晶體的波導與通常波導接合的高效率優化設計申請到國內專利，近場光學探針的新奇設計，使近場光學顯微儀得以能有效地進行次波長影像的獲得，此一成果亦取得國內專利，在未來，我們將開發光子晶體光纖的高雙折射結構及其相關的感測元件，為配合開發 21 世紀新的照明光源，一方面計算三或四能階原子與光子晶體的光場相互作用的輻射能譜。另一方面朝不定性材料與表面電漿極化子相結合的新領域，去探討揭開一些可能的新奇現象。

在超導方面，我們根據 Nb 薄膜的基底上製造出空間上不對稱排列的 antidot

array。在外加均勻磁場(垂直於薄膜)及一振盪或漲落的驅動力產生 ratchet 效應的元件。這是因為 vortex 在外加振盪力的作用下，往一方向的運動比另一方向較容易，此相當於單向的運動比另一方向較容易，此相當於單向街道。現在以改變外加振盪力的振幅就能使單向街道變成雙向街道。在未來的研究方向，將朝局域性雙向街道的元件的開發，以突破目前整個基底上的 vortex 在作控制性的雙向運動。目前，我們已在 Nb 薄膜上作成異質結構缺陷的 antidot array 進行量測中。模擬的工作也在進行中。

超導的另一個主題是有關電場效應，我們與捷克及德國研究已合寫一本“Ermoulli potential”書，在這本書中，將許多未來將研究的方向，基本上已勾畫出有待解決的問題，有些效應在高溫超導材料比較不顯著，但有些效應在高溫超導材料比較不顯著，但有些效應卻顯得明顯，例如 T_c 的上升。目前力圖尋找那些材料會突顯 Bernoulli potential。這也是未來要努力的研究工作之一。

四、 感謝詞

主持人真誠地感謝國科會支持三年期(92~94 年度)的研究計劃，使我們的研究工作向前推展到更高的層級。尤其在控制超導渦旋運動的新元件開發走在前緣。而在光子晶體的發展上，走在新元件的開發上，且提出新觀念，作為開發新元件的指導方針。

五、 參考文獻：

1. J. E. Villegas, Sergey Savel'ev, Franco Nori, E. M. González, J. V. Anguita, R. Garcia and J. L. Vicent, science, 302, 1188 (2003).
2. J. E. Villegas, E. M. Gonzalez, M. P. Gonzalez, J. V. Anguita, and J. L. Vicent, Phys. Rev. B 71, 24519 (2005).
3. B. Y. Zhu, F. Marchesoni, V. V. Moshchalkov, Franco Nori, Physica C 404, 260 (2004).
4. J. Van de Vondel, C. C. de Souza Silva, B. Y. Zhu, M. Morelle, and, V. V. Moshchalkov, Phys. Rev. Lett. 94, 57003 (2005).
5. Clecio C. de Souza Silva, J. Van de Vondel, B. Y. Zhu, M. Morelle, and V. V. Moshchalkov, Phys. Rev. B 73, 014507 (2006).
6. T. C. Wu, Lance Horng, J. C. Wu, C. W. Hsiao, Jan Koláček and T. J. Yang, J. Appl. Phys. 99, 08M515 (2006).
7. T. C. Wu, Lance Horng, C. W. Hsiao, J. C. Wu, and T. J. Yang, Physica C 437, 353 (2006).
8. Lance Horng, T. C. Wu, J. C. Wu, and T. J. Yang, to be published in J. Appl. Phys. (2007).
9. P. Lipavsky, K. Morawetz, J. Kolack, and T.J. Yang, Phys. Rev. B73, 052505 (2006).
10. P. Lopavsky, K. Morawetz, Jane Kolacer, E. H. Brandt and Tzong-Jer Yang, “ermoulli potential” to be published by springer Verlag in July 2007.
11. Jan. Kolacek, Tzong-Jer Yang, Chinese J. Phys. 43, 612 (2005).
12. Young Chung Hsue and Tzong-Jer Yang, Phys. Rev. E70, 1670 (2004).
13. Yuang-Fong Chan, Tzong-Jer Yang and Din Ping Tsai, J. APpl. Phys. 95, 3378 (2004).
14. Yuan-Fong Chau, Tzong-Jer Yang, and Ben-Yuan Gu, Jpn. J. Appl. Phys. 43, L1064 (2004).
15. Yuan-Fong Chau, Tzong-Jer Yang, and Din Ping Tsai. Jpn. J. Appl. Phys. 43, 8115 (2004).
16. Yuan-Fong Chau, Tzong-Jer Yang, and Win Der Lee, Applied Optics 43, 6656 (2004).
17. Wen-Long Liu, and Tzong-Jer Yang, Physica B368, 151 (2005).
18. Yuan-Fong Chau, Tzong-Jer Yang, Ben-Yuan Gu, and Win-Der Lee, Optics Commun. 253, 308 (2005).
19. Evgenii E. Narimanov and Vladimir M. Shalaev, Nature 447, 266 (2007).
20. Jorg Schilling, Phys. Rev. E74, 46618 (2006).
21. Akira Tonomura, Nature Materials 5, 257 (2006).
22. Franco Nori, Nature Physics 2, 227 (2006).

23. Hans Hilgenkamp, Victor V. Moshchalkov, Peter Kes, *Science* 302, 1159 (2003).
24. P. Hanggi, Fabi Marchesoni, and Franco Nori, *Ann. Phys. (Leipzig)* 14, No. 1-3, 51 (2005).
25. Ch. Jooss and V. Born, *Phys. Rev. B* 73, 94508 (2006).