

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

奈米超導結構磁通渦漩之傳輸特性與光學特性研究

Studies of transportation and photonic properties with flux vortex in nano-structured superconductors

計畫編號：NSC 99-2112-M-018-003-MY3

全程執行期限：2010年8月1日至2013年7月31日

第一年執行期限：2010年8月1日至2011年7月31日

主持人：洪連輝 彰化師範大學 物理系

phlhorng@cc.ncue.edu.tw

一、摘要

本研究主要是藉由實驗與模擬來探討在具有週期性奈米結構陣列的超導薄膜中磁通過漩的運動情形，並主要著藉由複合式釘扎陣列的研究，了解磁通過漩與缺陷間交互作用的關係。在實驗上，這一段時期所研究的週期性陣列包括蜂窩形陣列和複合式釘扎陣列。而模擬上，也是主要對這幾種釘扎陣列進行研究，另外也包括一些三角形釘扎陣列的比較研究。我們目前的模擬研究包括了兩種主要的方法，一種是以前較常用的分子動態模擬法，另一種是比較複雜的利用金茲堡-朗道方程的模擬。我們的目的是使這兩種方法互相配合，使我們更全面的了解磁通過漩與缺陷間交互作用的關係。

實驗上，我們利用電子束微影術及離子乾蝕刻技術在超導薄膜 Nb 上製作週期性陣列的釘扎中心。在溫度接近臨界溫度，在外加磁場下，磁通線進入超導體內並形成磁通過漩的規則分布。由於缺陷與進入超導的磁通的相互作用，使得在特定磁場下磁阻及臨界電流都有極值的產生，而這些極值的位置和大小都有一定的規律。這一段主要的工作是研究複合式釘扎陣列。除了繼續有初步成果的“大洞包圍小洞”的複合式釘扎陣列之外，我們又進行了相對應的“小洞包圍大洞”的複合式釘扎陣列的研究。把兩類複合式釘扎陣列的實

驗結果相比較，可以發現很有趣而且很有啟發性的結果。數值模擬的結果也能夠與實驗所得到的結果互相印證，對我們所得到的數據給出較好的解釋和說明。

二、緣由與目的

第二類超導體在混合態內的物理特性是許多研究者有興趣的，因為在此時的超導不再是完全反磁性，磁通線將以量子化磁通的形式進出超導體。因每根磁通量子都可看成是環形渦旋電流所產生的量子化磁通量的磁場，稱此磁通量子為渦旋線(vortex line)。

釘扎作用(flux pinning effect)是非理想第二類超導體特有的性質，它對超導材料的臨界電流密度有非常大的貢獻。第二類超導體在混合態時，穿入超導體的磁通會因羅倫茲力而移動，就會產生電阻及能量損失。若要提高臨界電流密度，減少能量耗損，就要把磁通穩固釘扎在超導內，其方法就是在晶格上製造一些缺陷。而且要用合適的製作技術，在不降低超導的臨界溫度和上臨界磁場值的情況下，製造出高密度的缺陷以增強釘扎的能力。

在有序的釘扎中心陣列中，改變釘扎中心顆粒的種類、尺度、間隔及形狀的關連性，可以探討磁通過漩線與磁通過漩線的交互作用及磁通過漩線與釘扎中心間的交互作用，和在超導體中所產生的許多靜

態和動態的有趣物理現象。釘扎效應的釘扎中心是由超導內部的缺陷或異相所產生的，而形成有效釘扎中心的尺度是和超導材料本身的特徵尺度有關，也就是相干長度 (coherence length) 及 穿透長度 (penetration depth)。釘扎中心的最佳尺度與特徵尺度的關連性是值得探討的問題。

釘扎力克服了羅倫茲斥力，使渦旋線不能運動，這個阻礙磁通線運動的力來自於缺陷。在混合態中，將超導的有效缺陷或釘扎中心排成週期性的陣列，若磁通釘扎中心陣列的密度與外加磁場所產生的磁通渦旋線的密度成比例時，臨界電流密度或磁通釘扎力對磁場的關係會有週期性的極值產生，稱為匹配效應(Matching Effect)。電子束微影術 (electron beam lithography) 是一種很有效的方法，可以製造出各種幾何形狀的微小的人造晶格陣列，不管是三角晶格、四方晶格、或是長方晶格都可藉由電子束微影的方法去製造出次微米大小的磁性點或凹陷，進而探討在超導體薄膜上的釘扎效應。為了研究超導磁通釘扎的機制，藉此提高臨界電流密度，許多研究者試著去控制或製造釘扎中心的大小或釘扎中心的排列方式，最近有幾個研究群利用電子束微影術，以電腦程式控制，割成不同距離的點狀週期性排列，來探討此種釘扎中心對臨界電流密度的影響。在高溫超導薄膜材料上利用高能量的電子束破壞薄膜的超導特性製造出週期性排列釘扎中心，也發現在傳統超導所具有的匹配效應 (matching effect)。而在蜂窩形週期性釘扎陣列和複合式週期性釘扎陣列的匹配效應與三角形和正方形週期性釘扎陣列的匹配效應相比，具有一定的不規則性，是我們在這一期研究中的重點。

三、蜂窩形週期性釘扎陣列的實驗與模擬結果並討論

這一部分的研究工作是在探討具有

蜂窩形週期性釘扎陣列的第二類超導體內磁通渦旋的流動情形。在實驗與模擬方面均已有了相當不錯的結果。實驗的程序是在利用半導體製程的方式使用下列的儀器在二類超導鈮薄膜上製作缺陷陣列：利用掃描式電子顯微鏡以電子束讓電子阻劑 PMMA 曝光，並結合乾蝕刻機以蝕刻氮化矽藉以在基板上產生凹陷。最後再製作電極且以真空直流濺鍍機將超導鈮鍍在這些凹陷。實驗上，磁通運動研究的探討是藉由磁通流動所造成的能量損耗，以了解磁通線與缺陷間作用情形。因此我們會採用四點量測的方式來了解超導鈮薄膜的電性。我們會將樣品置於超導量子干涉儀中將溫度設定在樣品的臨界溫度附近，而磁場則是垂直於鈮薄膜的表面。

主要的研究是製作不同幾何形狀的缺陷陣列，例如正方陣列、三角陣列、和蜂窩形陣列，來探討磁通線匹配效應。另外，我們運用電腦模擬來了解磁通和磁通間的交互作用以及磁通和缺陷間的交互作用。

當超導體內存在磁通渦流，此磁通渦流將受到其它磁通渦流的排斥力以及缺陷所造成釘扎力。若超導體內有電流通過，磁通渦流還會受到電由電流引起的羅倫茲力的推動。磁通渦流受到的力的作用可用下列運動方程式來描述：

$$\eta \mathbf{v}_i = \mathbf{f}_i = \mathbf{f}_i^{vv} + \mathbf{f}_i^{vp} + \mathbf{f}_i^T$$

這裡的 \mathbf{f}_i 為作用在第 i 根磁通渦流單位長度的總力。 \mathbf{f}_i^{vv} 為其它的磁通渦流作用在第 i 根磁通渦流上的總力。

$$\mathbf{f}_i^{vv} = \sum_{j=1}^{N_v} f_0 K_1 \left(\frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}{\lambda} \right) \hat{\mathbf{r}}_{ij}$$

\mathbf{f}_i^{vp} 為釘扎中心作用在第 i 根磁通渦流上的總力。

$$\mathbf{f}_i^{vp} = - \sum_{k=1}^{N_p} (f_p / r_p) (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k^{(p)}) H(\mathbf{r}_p - |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k^{(p)}|)$$

\mathbf{f}_i^T 為熱漲落引起的布朗力的作用。