

# Abstract

Quando il campo magnetico applicato è più alto del campo critico inferiore ma più basso del campo critico superiore, un superconduttore del II tipo permette al flusso magnetico di penetrarlo nella forma di vortici, una minuscola area normale circondata da supercorrenti. Sotto l'azione di una forza di Lorentz esterna o per attivazione termica, i vortici possono muoversi. Il loro moto induce dissipazione dell'energia ed eventualmente può distruggere la superconduttività. Recenti progressi nella nano-fabbricazione hanno portato a straordinarie possibilità per l'implementazione di strutture di pinning nei superconduttori e controllare così il moto dei vortici. La dinamica dei vortici in geometrie superconduttive confinate ha generato molto interesse nell'ambito dello studio sia delle proprietà fondamentali dei vortici e sia dei dispositivi basati sul loro moto. Durante gli ultimi anni una vasta mole di lavoro scientifico è stata dedicata al miglioramento di alcuni parametri critici dei materiali superconduttori. In particolare, l'introduzione di un reticolo regolare di centri di pinning artificiali in film sottili superconduttivi può portare alla riduzione del moto dei flussoni dando luogo a valori più alti della corrente critica [1–10]. Questo risultato è di importanza pratica poiché per applicazioni tecnologiche è richiesto ai superconduttori di lavorare a correnti critiche alte. In generale, ci sono due differenti tipi di centri di pinning ar-

tificiali. I primi sono imperfezioni random, per esempio ottenute mediante danneggiamento da radiazione [11], reticoli disordinati di buche [12–14], ecc. Gli altri sono reticoli periodici di difetti, cioè *antidot* (buche) [1–4, 7, 15], *dot* [6], e *dot* magnetici [5, 16, 17].

Recenti progressi nelle tecnologie di micro- e nano-fabbricazione hanno reso possibile la produzione di superconduttori con reticoli accuratamente controllati di difetti artificiali [4–10, 18–20] con la dimensione dei pori e la distanza tra i pori confrontabili con le lunghezze rivelanti dei superconduttori come la lunghezza di coerenza  $\xi(T)$  e la lunghezza di penetrazione  $\lambda(T)$ . Essendo uno dei metodi più efficienti e più semplici, l'introduzione del reticolo periodico di buche in film superconduttivi ha attirato molto interesse [4, 7–9]. Inoltre, film superconduttivi contenenti reticoli periodici di buche forniscono anche un'opportunità unica per comprendere il moto dei vortici ed il pinning in presenza di centri di pinning regolari. L'interazione tra le forze di pinning periodiche e la repulsione vortice-vortice genera una varietà di nuovi fenomeni come l'effetto di commensurabilità [18, 21], il raddrizzamento dei vortici [19], reticoli di linee di flusso composite [22], che non sono osservati in film superconduttivi continui.

L'effetto di commensurabilità tra il reticolo di vortici e il sottostante reticolo periodico di centri di pinning artificiali è una delle più interessanti proprietà dei film superconduttivi con array periodico [7, 8, 22, 23]. Tale effetto si manifesta con minimi nella dipendenza dal campo magnetico della resistenza,  $R(H)$ , o con massimi nella dipendenza della corrente critica,  $I_c(H)$ , quando il reticolo di vortici è commensurato con il sottostante array periodico di centri di pinning artificiali, cioè quando il campo magnetico

esterno corrisponde a multipli interi o frazioni del cosiddetto primo campo di matching  $H_1$ . Questo effetto è normalmente interpretato come un risultato dell'aumento del pinning [24–27], cioè i vortici hanno più difficoltà a muoversi ai campi di matching. In questo modo, si verifica un aumento del pinning e si ottengono correnti critiche alte (o minimi nella resistenza). Un simile effetto è stato anche osservato nelle reti superconduttive [28–30]. Le reti superconduttive sono strisce sottili unidimensionali (1D) superconduttive multiconnesse la cui larghezza  $w$  è confrontabile con la lunghezza di coerenza superconduttiva  $\xi(T)$ . Così, un film superconduttivo contenente un array periodico di buche può somigliare ad una rete superconduttiva a temperature prossime alla temperatura critica  $T_c$ . Entrambi questi meccanismi sono stati usati per interpretare gli effetti di commensurabilità osservati nelle misure di trasporto su film superconduttivi contenenti un array di buche a temperature prossime a  $T_c$ . Per esempio, in film di alluminio contenenti reticoli periodici di pori, Fiory et al. associavano le oscillazioni della magnetoresistenza ad una commensurazione tra il reticolo di vortici e quello dei pori artificiali [1], mentre Pannetier et al. attribuivano tali oscillazioni alle proprietà delle reti superconduttive [29]. Per comprendere la fisica correlata e per le possibili applicazioni, è necessario distinguere questi due meccanismi e identificare la reale origine dell'effetto di commensurabilità.

Questo lavoro di tesi presenta degli esperimenti della dinamica dei vortici in film superconduttivi di Nb ultra-sottile con differenti centri di pinning artificiali: magnetici e non magnetici. Sarà discussa anche un'evidenza della superconduttività 1D osservata in queste strutture.

Nel capitolo 1, dopo una breve introduzione degli aspetti principali della

superconduttività, sono discussi i concetti fondamentali della dinamica dei vortici, quali la resistività flux-flow e il pinning. L'implementazione dei difetti artificiali, come le buche, i dot magnetici, e differenti disposizioni di reticoli di pinning periodici e quasi-periodici, è presentata. Infine sono introdotti i principi fondamentali della superconduttività 1D.

Nel capitolo 2 sono illustrate le differenti fasi della formazione del silicio poroso. Sono anche discussi i parametri di anodizzazione che influenzano le caratteristiche finali dei substrati fabbricati.

Nel capitolo 3 sono presentate le proprietà di trasporto dei film di Nb ultra-sottile perforati depositati sul silicio poroso. Le transizioni resistive e le misure di corrente critica come funzioni del campo magnetico applicato mostrano effetti di matching tra il reticolo di vortici e la struttura dell'array dei centri di pinning.

Nel capitolo 4 è stata investigata, per mezzo di misure di trasporto in presenza di un campo magnetico applicato perpendicolarmente alla superficie del campione, l'interazione elettromagnetica tra il reticolo di vortici e l'array di centri di pinning magnetici in film di Nb depositati su substrati nanoporosi di  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contenenti un array di pori riempiti di Ni. È stato studiato il diagramma di fase  $(H, T)$  per questi sistemi e confrontato con quello di un film di Nb non poroso.

Nel capitolo 5 sono riportate le transizioni resistive e le caratteristiche corrente-tensione misurate su *bridge* di Nb ultra-sottile perforati depositati su Si poroso. A causa delle dimensioni molto ridotte del diametro dei pori e delle distanze tra i pori le osservazioni sperimentali portano fortemente alla mente aspetti della superconduttività 1D.

# Bibliografia

- [1] A.T. Fiory, A.F. Hebard, and S. Somekh, *Appl. Phys. Lett.* **32**, 73 (1978).
- [2] A.N. Lykov, *Solid State Commun.* **86**, 531 (1993).
- [3] A. Castellanos, R. Wördenweber, G. Ockenfuss, A.v.d. Hart, and K. Keck, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 962 (1997).
- [4] V.V. Moshchalkov, M. Baert, V.V. Metlushko, E. Rosseel, M.J. van Bael, K. Temst, Y. Bruynseraede, and R. Jonckheere, *Phys. Rev. B* **57**, 3615 (1998).
- [5] M.J. Van Bael, K. Temst, V.V. Moshchalkov, and Y. Bruynseraede, *Phys. Rev. B* **59**, 14674 (1999).
- [6] A. Hoffmann, P. Prieto, and I.K. Schuller, *Phys. Rev. B* **61**, 6958 (2000).
- [7] U. Welp, Z.L. Xiao, J.S. Jiang, V.K. Vlasko-Vlasov, S.D. Bader, and G.W. Crabtree, *Phys. Rev. B* **66**, 212507 (2002).
- [8] T.C. Wu, P.C. Kang, L. Horng, J.C. Wu, and T.J. Yang, *J. Appl. Phys.* **95**, 6696 (2004).

- [9] S. Raedt, A.V. Silhanek, M.J. Van Bael, R. Jockheere, and V.V. Moshchalkov, *Physica C* **404**, 298 (2004).
- [10] J. Hua, Z.L. Xiao, D. Rosenmann, I. Beloborodov, U. Welp, W.K. Kwok, and G.W. Crabtree, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 072507 (2007).
- [11] L. Civale, A.D. Marwick, T.K. Worthington, M.A. Kirk, J.R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, Y. Sun, J.R. Clem, and F. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 648 (1991).
- [12] J. Hua, Z.L. Xiao, D. Rosenmann, I. Beloborodov, U. Welp, W.K. Kwok, and G.W. Crabtree, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 072507 (2007).
- [13] M. Trezza, S.L. Prischepa, C. Cirillo, R. Fittipaldi, M. Sarno, D. Sannino, P. Ciambelli, M.B.S. Hesselberth, S.K. Lazarouk, A.V. Dolbik, V.E. Borisenko, and C. Attanasio, *J. Appl. Phys.* **104**, 083917 (2008).
- [14] M. Trezza, S.L. Prischepa, C. Cirillo, and C. Attanasio, *Europhys. Lett.* **88**, 57006 (2009).
- [15] J. Eisenmenger, M. Oettinger, C. Pfahler, A. Plettl, P. Walther, and P. Ziemann, *Phys. Rev. B* **75**, 144514 (2007).
- [16] J.I. Martín, M. Vélez, J. Nogués and I.K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1929 (1997).
- [17] M. Vélez, J.I. Martín, J.E. Villegas, A. Hoffmann, E.M. González, J.L. Vincent and I.K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, 2547 (2008).
- [18] U. Welp, Z.L. Xiao, V. Novosad, and V.K. Vlasko-Vlasov, *Phys. Rev. B* **71**, 14505 (2005).

- [19] J. Van de Vondel, C.C. de Souza Silva, B.Y. Zhu, M. Morelle, and V.V. Moshchalkov, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 57003 (2005).
- [20] G.R. Berdiyrov, M.V. Milosevic, and F.M. Peeters, *Phys. Rev. B* **74**, 174512 (2006).
- [21] V.V. Metlushko, U. Welp, G.W. Crabtree, Zhao Zhang, S.R.J. Brueck, B. Watkins, L.E. DeLong, B. Ilic, K. Chung, and P.J. Hesketh, *Phys. Rev. B* **59**, 603 (1999).
- [22] M. Baert, V.V. Metlushko, R. Jonckheere, V.V. Moshchalkov, and Y. Bruynseraede, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3269 (1995).
- [23] K. Harada, O. Kamimura, H. Kasai, T. Matsuda, A. Tonomua, and V.V. Moshchalkov, *Science* **274**, 1167 (1996).
- [24] Z. Jiang, D.A. Dikin, V. Chandrasekhar, V.V. Metlushko, and V.V. Moshchalkov, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 5371 (2004).
- [25] W. Vinckx, J. Vanacken, V.V. Moshchalkov, S. Mátéfi-Tempfli, M. Mátéfi-Tempfli, S. Michotte, and L. Piraux, *Eur. Phys. J. B* **53**, 199 (2006).
- [26] A. Terentiev, D.B. Watkins, L.E. De Long, L.D. Cooley, D.J. Morgan, and J.B. Ketterson, *Phys. Rev. B* **61**, 9249 (2000).
- [27] M. Velez, D. Jaque, J.I. Martin, F. Guinea, and J.L. Vicent, *Phys. Rev. B* **65**, 94509 (2002).
- [28] A. Bezryadin and B. Pannetier, *J. Low Temp. Phys.* **98**, 251 (1995).
- [29] A. Bezryadin and B. Pannetier, *J. Low Temp. Phys.* **102**, 73 (1996).

- [30] A.N. Grigorenko, G.D. Howells, S.J. Bending, J. Bekaert, M.J. Van Bael, L. Van Look, V.V. Moshchalkov, Y. Bruynseraede, G. Borghs, I.I. Kaya, and R.A. Stradling, *Phys. Rev. B* **63**, 052504 (2001).