

Superconductivity in S/F hybrids:
a Scanning Probe Microscopy study of orbital interaction

Abstract

Secondo la teoria fenomenologica di Ginzburg e Landau (G-L) [1], i superconduttori convenzionali, classificabili in *tipo I* e *tipo II*, si distinguono al variare del valore del parametro di G-L, $k = \frac{\xi}{\lambda}$, rispettivamente quando $k > \frac{1}{\sqrt{2}}$ e $k < \frac{1}{\sqrt{2}}$. La *lunghezza di coerenza* ξ definisce la scala su cui varia la densità delle coppie di Cooper mentre la *lunghezza di penetrazione* λ è la distanza su cui avviene lo schermaggio del campo magnetico esterno (*effetto Meissner*). In superconduttori di tipo II la nucleazione di quanti di flusso magnetico, o *vortici di Abrikosov* [2], in un range di campo $H_{c1} < H < H_{c2}$, dove H_{c1} e H_{c2} sono rispettivamente il *campo magnetico inferiore* e *superiore*, consente alla superconduttività di sopravvivere in alti campi magnetici e rende tali materiali tecnologicamente più rilevanti. Nella pratica, le applicazioni tecnologiche della superconduttività sono ancora limitate dalla capacità di controllare e/o evitare il moto dei vortici, il quale causa inevitabilmente dissipazione di energia, introducendo eventualmente dei *siti di pinning*.

In questo scenario, l'investigazione della dinamica dei vortici alle nanoscale consente la potenziale comprensione di un fenomeno macroscopico in termini di meccanismi microscopici. Tra tutte le tecniche sperimentali in grado di eseguire nano-esperimenti, *Magnetic Force Microscopy* (MFM) e *Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy* (STM/STS) consentono di studiare la distribuzione dei vortici, con risoluzione di un singolo quanto di flusso, tracciandone la polarità magnetica (MFM) ed in alti campi magnetici (STM/STS).

Eterostrutture planari Superconduttore/Ferromagnete (S/F), accoppiate solo magneticamente, cioè separate da uno strato isolante atto a sopprimere l'*effetto prossimità* [3], sono state proposte al fine di aumentare il pinning dei vortici, a

seguito dell'interazione magnetica dei quanti di flusso con il ferromagnete sottostante. Tuttavia, a causa dell'elevata sensibilità della fisica dei vortici alle nano-variazioni in dimensione e geometria dei materiali costituenti l'eterostruttura, lo studio di sistemi di questo tipo richiede sforzi preliminari in:

1. modellizzare l'interazione magnetostatica tra S nello stato misto ed F;
2. identificare i materiali costituenti appropriati;
3. riscaldare gli spessori al fine di realizzare film sottili.

In passato, molti dei fenomeni conseguenti all'interazione magnetostatica tra S ed F, sia in ibridi aventi strutture magnetiche nono-litografate sia in etero strutture planari, sono stati studiati sperimentalmente ed investigati teoricamente. Tale lavoro si è concentrato principalmente sugli effetti del template magnetico sulla nucleazione dei vortici, la loro conseguente dinamica e la localizzazione della superconduttività su domini magnetici e domain wall [4-22]. Tale letteratura, brevemente rivista nel Capitolo 1, ha guidato gli esperimenti discussi in questa dissertazione ed ha facilitato l'interpretazione dei dati sperimentali.

Il focus della tesi allegata è lo studio di nucleazione, dinamica e pinning di vortici in strutture S/F planari, costituite da film sottili di Nb/Py e Pb/[Co/Pd]_{multilayers}. La fabbricazione dei layer superconduttivi (Nb e Pb), isolanti (SiO₂ e Al₂O₃) e ferromagneti (Py and [Co/Pd]_{multilayers}), così come le procedure di deposizione, esulano dal gol principale dei questa dissertazione. Brevemente, gli ibridi Nb/SiO₂/Py sono stati fabbricati per *sputtering* ad *Argonne National Laboratory* (Chicago, IL (USA)) dal Dr. V. Novosad, dal Dr. V. Yefremenko e dal Dr. S.A. Moore, le eterostrutture [Co/Pd]_{multilayers} /Al₂O₃ sono state fabbricate dal Dr. V. Novosad, ed infine i film di Pb sono stati prodotti tramite *electron beam* alla *Temple University* (Philadelphia, PA (USA)) dal Dr. S.A. Moore. La scelta dei materiali è strettamente dipendente dalla tecnica di investigazione utilizzata. La dimensione dei domini magnetici e l'intensità dello stray field out-of-plane del Py sono ideali per

esperimenti MFM, mentre il ferromagnete $[\text{Co/Pd}]_{\text{multilayers}}$, avendo uno stray field out-of-plane molto più intenso potrebbe causare una sovrapposizione dei profili magnetici dei vortici, impedendone la risoluzione individuale. D'altra parte, la distanza vortice-vortice indotta dal Py e la dimensione dei suoi domini risulterebbe troppo grande per esperimenti STM/STS. Inoltre, mentre il Nb non è un buon material per investigazioni STM, a causa della facilità nell'ossidazione, il Pb, con $T_c=7.2\text{K}$, non è adeguato per gli esperimenti MFM presentati, in quanto condotti in un microscopio a scansione di forza Omicron (Omicron-Scanning Force Microscope) limitato da una *base temperature* di 5K.

Il principio di funzionamento di MFM e STM/STS è presentato nel Capitolo 2, e ad esso segue la descrizione dettagliata dei microscopi criogenici, in ultra-alto vuoto, utilizzati per condurre gli esperimenti descritti in questo lavoro di tesi.

Nel Capitolo 3, sono presentati esperimenti MFM criogenici su ibridi Nb/Py condotti al fine di investigare le condizioni di nucleazione spontanea di vortici ed il loro comportamento in campo magnetico. Dal momento che il Nb è un superconduttore convenzionale ed il Py un ferromagnete a temperatura ambiente con una peculiare configurazione a *stripe* dei domini magnetic out-of-plane, il field cooling del Nb nel campo non-uniforme del Py si verifica ogni qualvolta l'eterostruttura è raffreddata al di sotto della temperatura critica del S ($T_s=9\text{K}$). Di conseguenza, l'intensità della componente out-of-plane M_0 del Py può essere sufficiente ad indurre la nucleazione di quanti di flusso *spontanei*, con polarità opposte, coppie *vortice-antivortice*, concordi con la direzione della magnetizzazione del dominio sottostante. La nucleazione di V-AV spontanei e la loro densità può essere indirettamente controllata variando l'intensità di M_0 , la quale riscalda con lo spessore di F, o riducendo lo spessore di S. Infine, sono presentati esperimenti MFM in campo magnetico statico e dinamico con lo scopo di forzare e studiare la dinamica dei vortici.

Nel Capitolo 4, è presentata e studiata la peculiare distribuzione di vortici in presenza di specifici difetti della struttura magnetica, chiamati *biforcazioni*, che agiscono come centri di pinning locali e casualmente distribuiti. Il confinamento di vortici a seguito di tali dislocazioni è stato studiato combinando con successo esperimenti di MFM su Nb/Py ed esperimenti di STM/STS su Pb/[Co/Pd]_{multilayers}. La distribuzione dei quanti di flusso, che eventualmente clusterizzano in gruppi di vortici, risulta affetta non solo dall'incremento dello stray field al core della biforcazione ma anche dalla topologia stessa del difetto magnetico.

Infine, nel Capitolo 5, è discusso e presentato un nuovo metodo per eseguire esperimenti MFM quantitativi. L'idea di base è quella di estrarre la caratterizzazione magnetica della tip da esperimenti preliminari su campioni con stray field (o magnetizzazione) noti. In questo scenario, il vortice superconduttivo, che supporta il quanto di flusso $\Phi_0 = \frac{hc}{2e}$, rappresenta l'oggetto perfetto per sviluppare tale procedura di caratterizzazione. Alla discussione della procedura è affiancato un esempio di MFM quantitativa, che consente di stimare l'intensità della componente out-of-plane M_0 del (1 μ m)-Py film.

Bibliografia

- [1] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, *J. Exptl. Theoret. Phys.* **20**, 1064 (1950)
- [2] A.A. Abrikosov, *Sov. Phys. JETP* **5**, 1174 (1957)
- [3] A.I. Buzdin, *Rev. Mod. Phys.* **77**, 935 (2005)
- [4] S. Erdin, I. F. Lyuksyutov, V. L. Pokrovsky, and V. M. Vinokur, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 1 (2002)
- [5] G.M. Genkin, V.V. Skuzovaktin, I.D. Tokman, *J. Magn. Magn. Mater* **130**, 51 (1993)
- [6] I.K. Marmorkos, A. Matulis and F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* **53**, 2677(1996)
- [7] R. Lahio, E. Lähderanta, E. B. Sonin, K.B. Traito, *Phys. Rev. B* **67**, 144522 (2003)
- [8] A.I. Gubin, K.S. Il'in, S.A. Vitusevich, M. Siegel, N. Klein, *Phys. Rev. B* **72**, 064503 (2005)
- [9] M.V. Milosevic, and F. M. Peeters, *Physica C* **404**, 246 (2004)
- [10] Q.H. Chen, C. Carballeira and V. V. Moshchalkov, *Phys. Rev. B* **79**, 104520 (2009)
- [11] J.C. Piña, M. A. Zorro and C. C. de Souza Silva, *Physica C* **470**, 762 (2010)
- [12] M.V. Milosevic, F. M. Peeters and B. Jank, *Supercond. Sci. Technol.* **24**, 024001, (2011)
- [13] L. N. Bulaevskii, and E. M. Chudnovsky, M. P. Maley, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 18 (2000)
- [14] J. Ze, Y. Huadong and Z. You-He, *Supercond. Sci. Technol.* **27**, 105005 (2014)
- [15] A.A. Bespalov, A.S. Melnikov and A. I. Buzdin, *EPL (Europhysics Letters)* **110**, 37003 (2015)
- [16] A.Y. Aladyshkin, A. I. Buzdin, A. A. Fraerman, A. S. Mel'nikov, D. A. Ryzhov and A. V. Sokolov, *Phys. Rev. B* **68**, 184508 (2003)
- [17] A.Y. Aladyshkin, and V. V. Moshchalkov, *Phys. Rev. B* **74**, 064503 (2006)

- [18] Aladyshkin, A. Y., D. A. Ryzhov, A. V. Samokhvalov, D. A. Savinov, A. S. Mel'nikov and V. V. Moshchalkov, *Phys. Rev. B* **75**, 184519 (2007)
- [19] Aladyshkin, A. Y., A. S. Mel'nikov, I. M. Nefedov, D. A. Savinov, M. A. Silaev and I. A. Shereshevskii, *Phys. Rev. B* **85**, 184528 (2012)
- [20] M. Houzet, and A. I. Buzdin, *Phys. Rev. B* **74**, 214507 (2006)
- [21] S.V. Mironov, and A. S. Melnikov, *Phys. Rev. B* **86**, 134505 (2012)
- [22] A.Z. Miguel, S. Tiago and C. d. S. S. Clécio, *Supercond. Sci. Technol.* **27**, 055002 (2014)