

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/43299> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Voltan, Stefano

**Title:** Inducing spin triplet superconductivity in a ferromagnet

**Issue Date:** 2016-09-29

# RIASSUNTO

---

Combinare ferromagnetismo e superconduttività può dar vita allo sviluppo di una tecnologia di nuova generazione, con proprietà uniche e di gran lunga superiori alle tecnologie esistenti (basso consumo energetico, switching veloce, non-volatilità), la *spintronica superconduttiva*. Il raggiungimento di tale obiettivo, tuttavia, è limitato dal fatto che a livello microscopico lo stato superconduttivo e quello ferromagnetico sono intrinsecamente incompatibili. Infatti, in un superconduttore convenzionale gli elettroni sono accoppiati in *coppie di Cooper*, con gli spin allineati anti-parallelamente. In un ferromagnete, invece, gli spin elettronici sono allineati parallelamente a causa dell'*energia di scambio*. Perciò, quando una supercorrente (una corrente di coppie di Cooper) viene iniettata in un ferromagnete, l'energia di scambio tende ad allinearne gli spin. Questo provoca la "rottura" delle coppie di Cooper e quindi una rapida soppressione della supercorrente che svanisce dopo pochi nanometri. Lo scenario cambia nel caso in cui si abbia una *supercorrente di tripletto di spin*. Nello stato di tripletto gli spin elettronici sono allineati parallelamente, e perciò non vengono influenzati dall'energia di scambio: una volta iniettata nel ferromagnete, tale supercorrente può sopravvivere molto più a lungo (centinaia di nanometri), dando luogo alla coesistenza di superconduttività e magnetismo. La supercorrente generata, infatti, non solo è priva di effetti dissipativi ma è anche spin-polarizzata. Tale stato di tripletto, tuttavia, non è naturalmente presente nei superconduttori convenzionali e la questione fondamentale diventa quindi la possibilità o meno di generarlo. Secondo una proposta teorica avanzata più di un decennio fa, questo è possibile: se la magnetizzazione del ferromagnete è non uniforme all'interfaccia con il superconduttore, la supercorrente convenzionale può venire convertita in quella di tripletto. Sebbene il modello teorico sia relativamente chiaro, realizzare sperimentalmente le condizioni necessarie rimane una sfida. Negli ultimi dieci anni diversi esperimenti hanno confermato il modello teorico dimostrando indirettamente l'esistenza di supercorrenti indotte in ferromagneti per "lunghe" distanze, tuttavia un pieno controllo del fenomeno non è ancora stato raggiunto. Il lavoro presentato in questa tesi costituisce uno studio più approfondito del meccanismo di conversione della supercorrente, al fine di meglio comprendere e ottimizzare il processo di generazione delle supercorrenti di tripletto.

I **Capitoli 1 e 2** introducono al lettore l'argomento di ricerca, spiegano le motivazioni di questo lavoro e forniscono una veloce panoramica dei concetti teorici di base che descrivono i fenomeni della superconduttività, del ferromagnetismo e dell'interazio-

ne tra i due stati. Nei capitoli successivi vengono studiate le proprietà elettriche di piccole strutture ibride, per lo più composte da strati di ferromagneti e superconduttori. Misurando la resistenza elettrica di queste etero-strutture in funzione di parametri quali la temperatura o il campo magnetico applicato, è possibile dedurre, indirettamente, lo stato di (super)conduttività nei diversi strati. In particolare in questa tesi vengono studiati tre differenti tipi di strutture, allo scopo di discutere diversi aspetti collegati alla generazione dei tripletti.

I **Capitoli 3 e 4** sono dedicati allo studio del permalloy come possibile generatore di superconduttività di tripletto. Il permalloy è una lega di nichel e ferro ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) ed è un ferromagnete “soft”. Film sottili di questo materiale depositati in particolari condizioni sperimentali, possono mostrare una peculiare configurazione magnetica, molto disomogenea. Nel **Capitolo 3** vengono studiate nel dettaglio le proprietà magnetiche del permalloy, con diverse tecniche sperimentali. Dai risultati ottenuti si possono identificare tre regimi in funzione dello spessore del materiale: regime omogeneo (H; per i campioni più sottili), di *emerging stripe domains* (ESD; spessori intermedi) e di *stripe domains* (SD; campioni più spessi). Mentre il primo e il terzo regime sono noti e ampiamente caratterizzati in letteratura, il regime di *emerging stripe* ha caratteristiche singolari, e non è stato studiato finora. Nel **Capitolo 4** viene mostrato che questo stato magnetico intermedio offre le migliori condizioni per la generazione di tripletti, se affiancato ad un superconduttore. In particolare viene studiata la dipendenza del campo magnetico critico dalla temperatura per alcuni bilayer niobio/permalloy e trilayer niobio/permalloy/niobio. I risultati indicano chiaramente che quando il permalloy è nel regime ESD, lo stato superconduttivo può penetrare il ferromagnete per lunghe distanze, perché presumibilmente convertito nello stato di tripletto. La possibilità di generare la corrente di tripletto direttamente nel ferromagnete stesso, senza la necessità di strati aggiuntivi, è molto attraente per le applicazioni pratiche, tuttavia la mancanza di una descrizione comprensiva dello stato magnetico rende difficoltoso un totale controllo del fenomeno.

Nei **Capitoli 5 e 6** vengono trattate le *triplet spin valve superconduttive*. Una spin valve, in generale, è una struttura multistrato in cui la conduttività elettrica dipende dall'allineamento magnetico (degli spin) di due diversi strati magnetici: la *spin valve* può essere selettivamente *aperta* (bassa resistenza, la corrente scorre) o *chiusa* (alta resistenza, la corrente è bloccata) modificando il relativo orientamento della magnetizzazione dei ferromagneti. Una *triplet spin valve superconduttiva* consiste in uno strato superconduttivo (la lega MoGe, nel caso specifico) a fianco di due strati ferromagnetici. I due strati sono rispettivamente chiamati *mixer layer* (spesso pochi nanometri e usato per introdurre artificialmente la disomogeneità) e *drainage layer* (molto più

spesso, e in cui lo stato superconduttivo viene indotto). In questo caso, il meccanismo *aperto/chiuso* è strettamente legato alla generazione di triplette: quando le magnetizzazioni dei due ferromagneti sono propriamente (dis)allineati, i triplette vengono generati e iniettati nel ferromagnete di *drainage* (stato *aperto*); se invece le magnetizzazioni sono parallele non c'è generazione di triplette e di conseguenza le coppie di Cooper convenzionali non possono penetrare il ferromagnete (stato *chiuso*). La penetrazione della supercorrente a lunga distanza (quindi la generazione di triplette) può essere dimostrata dall'osservazione dell'alterazione delle proprietà superconduttive delle strutture, indicate da una variazione della temperatura critica misurata (o del campo critico). L'importanza dei risultati presentati risiede nella scelta del *drainage layer*, il diossido di cromo ( $\text{CrO}_2$ ). La peculiarità del  $\text{CrO}_2$  consiste nel fatto che, a causa del totale allineamento degli spin (polarizzazione di spin del 100 %), la lunghezza di penetrazione dei triplette risulta notevolmente estesa. Di conseguenza l'effetto di triplette valve, misurato dalla variazione della temperatura critica della struttura, è almeno un ordine di grandezza maggiore di quanto riportato precedentemente per ferromagneti convenzionali. Questo è il risultato principale presentato nel **Capitolo 5** in cui viene analizzato anche il ruolo fondamentale della trasparenza dell'interfaccia tra i diversi strati. Nel **Capitolo 6** viene studiata la dipendenza dell'effetto dallo spessore del *mixer layer*, gli effetti dell'accumulazione di spin all'interfaccia e come la generazione di triplette influenzi considerevolmente il campo magnetico critico. Nel complesso, i risultati dimostrano chiaramente gli effetti della generazione dello stato di triplette, ed evidenziano il grande potenziale offerto dal  $\text{CrO}_2$  per lo sviluppo di applicazioni nell'ambito della spintronica.

Nel **Capitolo 7** le strutture d'interesse sono le *giunzioni Josephson*. Una giunzione Josephson consiste in due superconduttori separati da un diverso materiale, di lunghezza (o spessore) variabile. Se la supercorrente può fluire da un lato all'altro della giunzione attraverso il materiale intermedio senza venire soppressa, i due superconduttori risultano accoppiati. Di conseguenza l'intera struttura ha resistenza nulla e si osservano interessanti effetti quantistici. In questo capitolo non viene studiata direttamente la generazione di triplette, ma più in generale l'effetto indotto da un ferromagnete sull'accoppiamento Josephson. Nelle strutture misurate, il materiale tra i due superconduttori (niobio) è un bilayer costituito da uno strato di metallo normale (rame) e uno strato ferromagnetico, molto più sottile (cobalto). Quando solo il rame è presente, la supercorrente può attraversare il metallo normale e l'accoppiamento avviene per lunghezze di separazione tra i due superconduttori fino a diverse centinaia di nanometri. Sorprendentemente, quando un sottile strato ferromagnetico è aggiunto alla base del metallo normale, l'accoppiamento è fortemente compromesso.

Lo studio offre un approfondimento sul ruolo dell'energia di scambio sulla superconduttività e fornisce informazioni utili sulla particolare geometria della struttura, impiegata anche in esperimenti volti a studiare la superconduttività di tripletto. Questo capitolo, insieme ai precedenti, rappresenta un contributo verso la comprensione e lo sviluppo della nuova e promettente tecnologia della spintronica superconduttiva.