



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Magnetic imaging of spin waves and magnetic phase transitions with nitrogen-vacancy centers in diamond

Bertelli, I.

### Citation

Bertelli, I. (2021, November 24). *Magnetic imaging of spin waves and magnetic phase transitions with nitrogen-vacancy centers in diamond*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3245183>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3245183>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# SOMMARIO

Le eccitazioni elementari dei materiali magnetici sono chiamate onde di spin (*spin waves*), e le corrispondenti quasiparticelle prendono il nome di *magnoni*. Il campo di studi della *Magnonica*, in rapida crescita, ha come obiettivo l'uso delle onde di spin per il trasporto ed elaborazione di informazione in una nuova generazione di dispositivi elettronici, (quasi) privi di correnti elettriche. La codifica dell'informazione nell'ampiezza e/o nella fase di queste onde coerenti potrebbe portare ad un decremento drastico dell'energia dissipata, solitamente collegata al movimento di elettroni (riscaldamento "Ohmico" o "Joule").

Questa tesi tratta lo sviluppo e l'uso di una nuova tecnica per studiare le onde di spin. Alla base di tale tecnica vi è l'utilizzo dello spin elettronico associato ai cosiddetti "centri di colore" azoto-vacanza (nitrogen-vacancy, NV) come sensori di campo magnetico. Un centro NV è un difetto nel reticolo cristallino del diamante che emette luce. La luminosità dell'emissione dipende dallo stato del suo spin elettronico, rendendo possibile studiare proprietà magnetiche con mezzi ottici.

Il campo della magnonica viene descritto nel Capitolo 1, in cui si discute il vasto potenziale per l'innovazione tecnologica, che a sua volta conduce a diverse direzioni di ricerca e allo sviluppo di tecniche di *imaging*. Nel Capitolo 2 vengono trattate le proprietà strutturali, ottiche ed elettroniche dei centri NV, ed introdotte le tecniche sperimentali utilizzate in questa tesi per misurare campi magnetici statici o oscillanti.

Nel Capitolo 3 viene presentato un trattamento teorico delle onde di spin, che comprende la derivazione della loro dispersione a partire dalle equazioni della dinamica della magnetizzazione (equazioni di Landau-Lifshitz-Gilbert). Successivamente vengono introdotte le equazioni che governano l'eccitazione induttiva delle onde di spin (rilevante per i capitoli 4-5), e vengono discussi i campi magnetici da esse generati, punto di partenza per capire gli esperimenti sulle onde di spin basati sui centri NV.

Nel Capitolo 4 viene presentata una nuova tecnica di osservazione di onde di spin coerenti, tramite il loro campo magnetico, con sensibilità di fase. Questa tecnica si basa sull'interferenza tra il campo magnetico delle onde di spin ed il campo omogeneo di una antenna esterna, aventi la stessa frequenza e con differenza di fase costante, così che la loro interferenza è stazionaria. In questo modo possiamo osservare l'ampiezza delle onde di spin risonanti con lo spin dei centri NV. La conoscenza del campo ausiliario permette di ricostruire il campo magnetico dell'onda di spin così che, in configurazioni modello, possiamo misurare l'ampiezza dell'onda di spin in modo quantitativo.

Usando la tecnica sviluppata e la sua capacità di osservare attraverso materiali, nel Capitolo 5 viene descritta l'osservazione di onde di spin che si propagano al di sotto di elettrodi metallici, e viene quantificato l'aumento di smorzamento da essi causato. Questo fenomeno è rilevante in dispositivi in cui l'eccitazione, controllo e rilevamento delle onde di spin è realizzato attraverso *gate* metallici. Si rileva un aumento dello smorzamento delle onde di spin di un fattore 100, e mostriamo che questo è in linea con lo smorzamento effettivo calcolato includendo il campo magnetico delle correnti parassite all'interno delle equazioni LLG in modo autoconsistente.

Nel Capitolo 6 ci focalizziamo su onde di spin eccitate in modo termico, e caratterizziamo lo spettro delle fluttuazioni magnetiche che generano utilizzando la rilassometria NV - che comporta la preparazione dello spin del centro NV in un predeterminato stato e la misura della sua decoerenza nel tempo. Tali fluttuazioni sono collegate alle eccitazioni del sistema attraverso il teorema di fluttuazione-dissipazione. I risultati sono in accordo con un modello teorico basato sull'accoppiamento chirale tra i campi magnetici delle onde di spin e lo spin del centro NV. Tuttavia, riscontriamo incongruenze sorprendenti alla frequenza della risonanza ferromagnetica, che suggeriscono la presenza di disomogeneità nel sistema.

I centri NV sono eccellenti sensori locali di campi magnetici. Una sfida relativa alla *località* dei risultati è come quantificare efficacemente proprietà che sono intrinsecamente *globali*, come ad esempio la temperatura di una transizione di fase. Nel Capitolo 7 mostriamo che una possibile soluzione a questo problema è fornita dall'uso di analisi statistiche per quantificare le correlazioni spaziali. Utilizziamo questi metodi per studiare la transizione metamagnetica (da antiferromagnete a ferromagnete) di fase, guidata dalla temperatura, della lega magnetica FeRh. Osserviamo la nucleazione, crescita e coalescenza di domini magnetici, e troviamo evidenze sperimentali che indicano la presenza di un riorientamento dei domini magnetici durante la transizione di fase.