

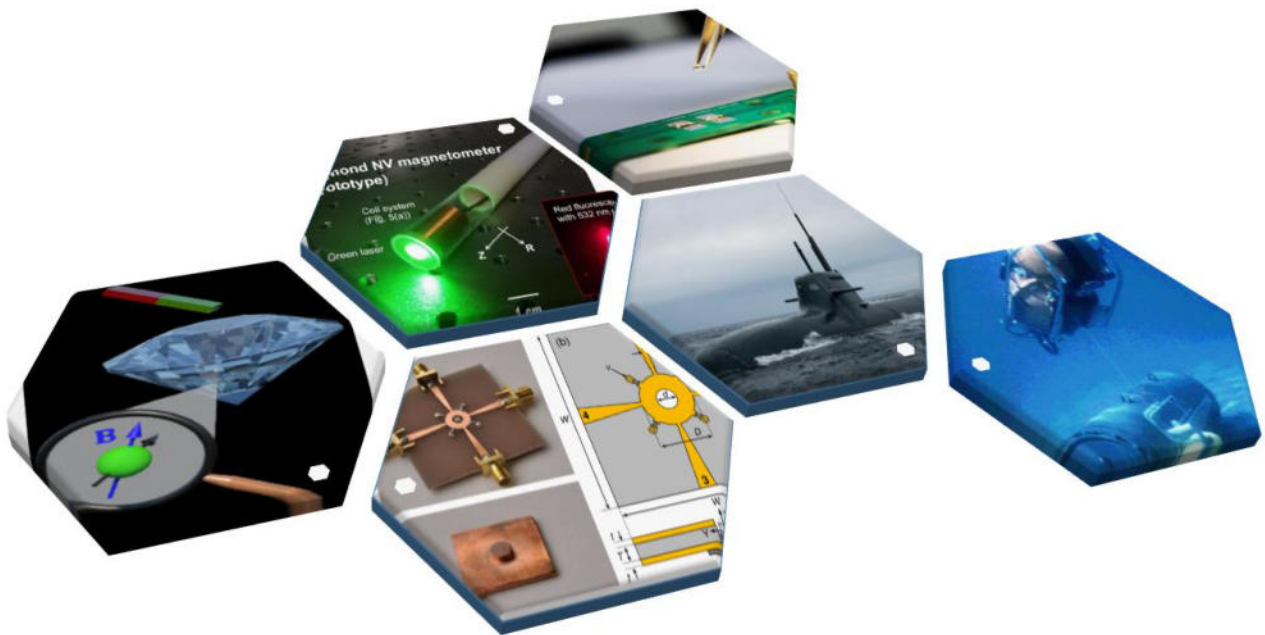
SAPIENZA - Università di Roma

Master di II Livello

Optics & Quantum Information

TESI

***Impiego di magnetometri quantistici basati sulle vacanze
di azoto all'interno di nano cristalli di diamante per
applicazioni militari nella lotta Anti Submarine Warfare***



Candidato

**Capitano di Corvetta
Simone LA RIVIERA**

Relatore

**Professore
Fabio Antonio BOVINO**

Abstract

Impiego di magnetometri quantistici basati sulle vacanze di azoto all'interno di nano cristalli di diamante per applicazioni militari nella lotta Anti Submarine Warfare

I sistemi di magneti vettoriali criogenici¹ consentono di studiare le proprietà magnetiche anisotropiche dei materiali senza ruotare meccanicamente il campione, ma inclinando (o ruotando elettricamente) il campo magnetico immesso. I campi magnetici vettoriali generati all'interno di magneti vettoriali superconduttori (come gli SQUID²) sono generalmente misurati con tre sonde che devono essere calibrate su un intervallo di temperatura. Inoltre la calibrazione non potrà essere eseguita in maniera semplice in quanto all'interno del magnete superconduttore già magnetizzato vi sarà un residuo di campo magnetico³, senza considerare inoltre le difficoltà che dovranno essere superate per mantenere le condizioni di superconduzione con il mantenimento di basse temperature che richiedono refrigeranti come azoto o elio liquido.

Questo elaborato si pone l'obiettivo di approfondire lo studio dei sensori per la misura delle anomalie magnetiche che superino le limitazioni sopra esposte, impiegando un singolo magnetometro basato su un insieme di centri di vacanza di azoto (*Nitrogen Vacancy - NV*) nel diamante.

Nello specifico, partendo dall'assunto che all'interno del diamante, costituito da un reticolo di atomi di carbonio, possono trovarsi numerosi difetti (uno di questi è il NV), è possibile pensare di impiegare un radiazione ottica nello spettro del verde per eccitare proprio un centro di NV. Il risultato di tale azione di eccitazione sarà il decadimento allo stato fondamentale passando (o meno) per uno stato intermedio con diversa fluorescenza. Il percorso di decadimento dipenderà dallo spin dell'elettrone del centro di NV e potrà essere influenzato dalla presenza di campi magnetici. Inizializzando lo spin a temperatura ambiente e leggendolo otticamente, sarà possibile effettuare misure di campi magnetici con alta sensibilità e alta risoluzione spaziale che permetteranno l'impiego di tale sensore quantistico per molteplici esperimenti ed applicazioni.

Dal punto di vista tecnico, i vantaggi dell'impiego di tali sensori risiedono nel fatto di poter velocemente e facilmente cancellare il campo magnetico residuo (si abbatte il rumore della misura) e di effettuare la misura dei campi magnetici vettoriali in tre dimensioni con un unico sensore e a temperatura ambiente (si abbattano i costi di realizzazione).

Dal punto di vista militare, l'impiego di questi magnetometri quantistici potrebbe comportare un nuovo approccio alla rivelazione delle anomalie magnetiche nel campo dell'*Anti-Submarine Warfare* (ASW). Oggi infatti, i moderni sottomarini abbattano notevolmente la loro segnatura magnetica grazie all'impiego di materiali amagnetici. Tuttavia, l'impiego di più sensori quantistici molto sensibili ed a basso costo potrebbe portare nel prossimo futuro a modificare l'approccio operativo nella lotta ASW.

Infine, questi sensori potrebbero avere risvolti d'impiego anche nel settore civile in applicazioni di biomedicina, nel monitoraggio dell'inquinamento in mare oppure per nella ricerca di giacimenti ferrosi.

¹ Concernente gli studi e le tecniche relative alla produzione delle basse e bassissime temperature ed alle loro applicazioni pratiche.

² SQUID è l'acronimo, in lingua inglese, di *Superconducting Quantum Interference Devices*: dispositivo superconduttore a interferenza quantistica. Gli SQUID sono magnetometri estremamente sensibili, usati per misurare campi magnetici deboli, e sono costituiti da un anello superconduttore contenente una o più giunzioni Josephson

³ Mantenere un basso campo magnetico ambientale è un requisito fondamentale per soddisfare la condizione di basso rumore.

Sommario

Abstract	1
Acronimi	5
Premessa	6
Capitolo 1 – Strumenti di misura del campo Magnetico.....	7
Magnetometri Tradizionali.....	7
Magnetometri Quantistici	7
Capitolo 2 – La nuova frontiera dei sensori magnetometrici.....	9
Principio di funzionamento	10
Schema di realizzazione e valori di sensibilità di un magnetometro basato sul centro di NV del diamante	13
Esempio di realizzazione pratica del sensore.....	15
Possibili applicazioni: dalla risonanza magnetica all’imaging di oggetti	17
.....	18
Capitolo 3 – Importanza della magnetometria nelle applicazioni militari	19
Il campo magnetico terrestre	19
La segnatura magnetica delle unità navali	21
Simulazione e predizione della firma magnetica.....	22
Le basi di misura magnetica	22
Gestione della Segnatura Magnetica	23
Deperming	23
Degaussing System	24
I sensori magnetici basati sulle NV del diamante: un possibile <i>game changer</i>	25
Capitolo 4 – Valenza operativa dei Magnetometri Quantistici	27
Futuri campi di applicazione.....	27
Caccia ASW ed operazioni MCM con UUV	27
Caccia ASW con UAV	28
Sistemi di sorveglianza subacquea	29
Mine ad attivazione magnetica	30
Utilità dell’elaborato per la Forza Armata.....	31
Bibliografia.....	32
Allegato 1 – Effetto Hall.....	33
Cos’è l’effetto Hall	33
Utilizzi	34
Allegato 2 – Giunzione Josephson.....	35
Principio di funzionamento ed applicazione negli SQUID	35
Allegato 3 – Spin Elettronico	36

Che cosa è lo Spin	36
La scoperta dello spin	36

Indice delle Figure

Figura 1: reticolo cristallino del diamante	10
Figura 2: centro di vacanza dell'azoto	10
Figura 3: possibili configurazioni del centro di vacanza	10
Figura 4: fascio laser verde che eccita il nano cristallo	10
Figura 5: due possibili polarizzazioni dovute all'anisotropia della NV	10
Figura 6: effetto dell'eccitazione del nano cristallo con laser verde	11
Figura 7: variazione della frequenza di risonanza in funzione della magnitudo del campo magnetico	11
Figura 8: esempio di misura di risonanza dello spin elettronico	11
Figura 9: variazione del lifetime in funzione della magnitudo del campo magnetico	12
Figura 10: geometria dell'asse di NV	12
Figura 11: influenza della direzione del campo magnetico sulla frequenza di risonanza dello spin	12
Figura 12: legame tra angolo di puntamento del campo magnetico e lifetime	12
Figura 13: schema di massima di un magnetometro basato su NV del diamante	13
Figura 14: variazioni di intensità del fascio luminoso	13
Figura 15: frequenza a cui si riscontra la massima caduta di intensità	14
Figura 16: sensibilità di misura del sensore magnetico	14
Figura 17: bobine di cancellazione del segnale a microonde	14
Figura 18: cancellazione del rumore interferente	15
Figura 19: riduzione misurata della luminescenza	15
Figura 20: esempio di realizzazione pratica	15
Figura 21: schema circuitale del risuonatore	16
Figura 22: shift frequenziale dovuto al diverso orientamento del campo magnetico	16
Figura 23: cambio della frequenza centrale di lavoro	17
Figura 24: filtri digitali per la cancellazione del rumore interferente	18
Figura 25: la magnetosfera terrestre	19
Figura 26: tasso di variazione del campo magnetico terrestre	20
Figura 27: effetto dell'interazione tra campo magnetico terrestre con un oggetto ferroso	20
Figura 28: unità cacciamine a ridotta segnatura magnetica	20
Figura 29: sottomarino classe U212A in scafo amagnetico	21
Figura 30: modelli di simulazione magnetica	22
Figura 31: riduzione della segnatura magnetica con impiego di sistemi di degaussing	22
Figura 32: sistema di deperming di tipo Static Over-run	23
Figura 33: sistema di deperming di tipo drive-in	23
Figura 34 sistema di deperming di tipo Close-Wrap	24
Figura 35: avvolgimenti dello scafo navale per il degaussing	24
Figura 36: sistema di degaussing di tipo CLDG dei moderni sottomarini	25
Figura 37: impiego di unmanned nella lotta ASW	27
Figura 38: ROV in operazioni MCM	28
Figura 39: UAV di piccole dimensioni	28
Figura 40: disposizione degli array SOSUS	29
Figura 41: lofargramma del SOSUS	29
Figura 42: esplosione di mina subacquea	30
Figura 43: magnetometro tipo fluxgate	30
Figura 44: schematizzazione dell'effetto Hall	33
Figura 45: esempio di sonda di Hall	34
Figura 46: giunzione di Josephson	35
Figura 47: SQUID composto da un anello superconduttore e giunzioni di Josephson	35

Acronimi

ASW	<i>Anti Submarine Warfare</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CLDG	<i>Closed Loop DeGaussing</i>
CPMG	<i>Carr-Purcell-Meiboom-Gill Sequence</i>
ESR	<i>Electronic Spin Resonance</i>
HTS	<i>High Temperature Superconductors</i>
IP	Industria Privata
MAD	<i>Magnetic Anomaly Detector</i>
MCM	<i>Mine Counter Measures</i>
NNMR	<i>Nanoscale Nuclear Magnetic Resonance</i>
NV	<i>Nitrogen Vacancy</i>
ODMR	<i>Optical Detector Magnetic Resonance</i>
PNRM	Piani Nazionali di Ricerca Militare
PVC	Cloruro di Polivinile
ROV	<i>Remotely Operating Vehicle</i>
SOSUS	<i>SOund SURveillance System</i>
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Devices</i>
UAV	<i>Unmanned Air Vehicle</i>
UUV	<i>Underwater Unmanned Vehicle</i>
ZEE	Zona Economica Esclusiva

Premessa

Le potenzialità della tecnologia quantistica sono oggi discusse in numerosi consessi nazionali ed internazionali, spesso ponendo insieme le diverse sfaccettature della *Quantum Technology*. La più nota e blasonata è sicuramente la *Quantum Computing* su cui lavorano le più grandi multinazionali come Google e IBM. Oggigiorno il *Quantum Computing* è di fatto il segno più tangibile di quello che potrebbe essere nel futuro un “termometro” geopolitico del peso di una nazione secondo la banale equazione “più potenza di calcolo più importanza strategica”. Tuttavia, risulta riduttivo confondere la *Quantum Technology* con il *Quantum Computing*. Ulteriori settori come la *Quantum Communication*⁴, *Quantum Sensing* e *Quantum Simulation*⁵ potranno rivelarsi nel prossimo futuro, qualora raggiungano un adeguato livello di maturità, delle tecnologie con una forte valenza strategica nello scacchiere internazionale.

In questo elaborato si porrà l’attenzione sul *Quantum Sensing*, campo di applicazione di per se già vasto poiché comprende numerosi ambiti che vanno dagli orologi atomici di altissima precisione (utilizzabili per esempio nella prossima generazione di satelliti GPS) a sensori in grado di misurare determinate proprietà fisiche (per esempio sostanze chimiche, campi magnetici e gravitazionali) con sensibilità e precisione irraggiungibili con metodi classici. Nello specifico, si porrà l’attenzione su una nuova tipologia di sensori magnetici quantistici basati sui centri di vacanza di azoto (*Nitrogen Vacancy* - NV) all’interno dei nano cristalli di diamante che possono potenzialmente essere impiegati per la misurazione di proprietà ambientali come la temperatura, i campi magnetici ed elettrici, con sensibilità di misura e risoluzioni particolarmente spinte.

Si focalizzerà l’attenzione sulle capacità di tali sensori di determinare con enorme accuratezza le anomalie magnetiche presenti, in quanto, come sarà chiaro al termine del documento, tale misura ha un’enorme valenza strategica, legata soprattutto alle possibilità di scoperta di particolari assetti bellici di uno Stato, come lo sono i sottomarini.

Per quanto suddetto, risulterà doveroso partire con una breve disamina sia degli attuali strumenti tradizionali sia di quelli quantistici, come gli SQUID, per la misura del campo magnetico (**Capitolo 1**), volgendo particolare attenzione a quelli quantistici, di ultimissima generazione, basati sulle NV dei nano cristalli di diamante (**Capitolo 2**) che risolvono i principali problemi legati all’impiego dei magnetometri SQUID. Naturalmente, le potenziali prestazioni dei sensori, oggetto dell’elaborato, dovranno essere opportunamente contestualizzate alla principale tipologia di bersaglio che si pongono di rivelare, pertanto verrà introdotta la tematica della riduzione della segnatura magnetica dei sottomarini e delle unità navali (**Capitolo 3**) facente parte della dottrina militare nella lotta *Anti-Submarine Warfare* (ASW). Infine dopo aver messo sul “piatto della bilancia” da un lato la nuova frontiera dei sensori magnetici quantistici, dall’altro i moderni strumenti e tecnologie che adottano i sottomarini per rendere praticamente nulla la propria segnatura magnetica, si punterà l’attenzione su tutte quelle applicazioni militari⁶ su cui la ricerca dovrà puntare per permettere la piena integrazione di questi sensori all’interno di piattaforme, sistemi e armi che congiuntamente potrebbero portare a dover rivalutare gli attuali paradigmi della lotta ASW (**Capitolo 4**).

⁴ La *Comunicazione Quantistica* comprende sia metodi di “teletrasporto” del singolo stato quantistico sia le tecniche di comunicazione in grado di rendere intrinsecamente inattaccabili i sistemi crittografici classici.

⁵ La *Simulazione Quantistica* offre molteplici possibilità di verificare il funzionamento di modelli di fenomeni applicativi, ad esempio la generazione ed il trasporto di energia solare, la realizzazione di materiali polifunzionali, e persino modelli di apprendimento per l’intelligenza artificiale.

⁶ Si farà cenno anche ad applicazioni in ambito civile.

Capitolo 1 – Strumenti di misura del campo Magnetico

Magnetometri Tradizionali

I magnetometri sono strumenti di misura del campo magnetico. Esistono sostanzialmente di due tipologie: i magnetometri scalari, che misurano solo il modulo del campo magnetico e i magnetometri vettoriali, che misurano la componente del campo magnetico lungo una particolare direzione dello spazio. La misura delle componenti del campo lungo le tre direzioni permette di definire unicamente il vettore di campo magnetico nel punto in cui si effettua la misura.

I più tradizionali magnetometri vettoriali sono quelli ad ago. Questi sono costituiti da un ago di materiale magnetizzato sospeso tramite un sistema meccanico ad attrito ridotto che permette di orientare l'ago parallelamente al campo magnetico, rivelandone la direzione. Il sistema non è però in grado di fornire l'intensità del campo, ma a differenza della bussola, fornisce nello spazio 3D, l'angolo di inclinazione del campo magnetico.

Altre tipologie di magnetometri tradizionali sono quelli a bobina e quelli che sfruttano l'effetto Hall⁷. I magnetometri a bobina misurano l'intensità del campo magnetico, sfruttando l'induzione elettromagnetica in una bobina. Ponendo, infatti, una bobina piana in un campo magnetico, si osserva ai suoi capi una tensione elettrica che dipenderà dal campo magnetico che attraversa la bobina ($\vec{B}$), dal versore del flusso di campo ($\hat{n}$) e dall'area (A) della spira secondo la seguente relazione:

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\vec{B} \cdot \hat{n}}{dt} A \quad (1)$$

Grazie all'impiego di queste bobine, attraverso la misura della tensione, sarà possibile ricavare la variazione temporale della componente del campo magnetico normale alla spira.

I magnetometri, basati sull'effetto Hall, sono invece costituiti da una piastra conduttrice percorsa da corrente elettrica. A causa proprio dell'effetto Hall, ai suoi bordi si verifica una tensione proporzionale alla componente del campo magnetico normale alla piastra. Le dimensioni tipiche di queste sonde sono dell'ordine dei centimetri e vengono utilizzate per la mappatura di campi magnetici elevati.

Esistono poi dei magnetometri costituiti da un recipiente riempito con una sostanza ricca di protoni (tipicamente idrocarburi) avvolti da un solenoide. Il solenoide è inizialmente percorso da una corrente tale da produrre un campo magnetico di intensità molto maggiore rispetto al campo da misurare. In questo modo i protoni che sono dotati di momento magnetico intrinseco, si allineano rapidamente al campo in cui sono immersi. In seguito, la corrente viene interrotta e i protoni risultano soggetti al solo campo magnetico esterno. In queste condizioni essi precedono con una frequenza $f = \alpha |\vec{B}|$ (frequenza di Larmor), generando nel solenoide una tensione indotta di uguale frequenza, misurabile attraverso un frequenzimetro. Essendo α conosciuto con buona accuratezza, è possibile effettuare letture con precisione da 0,01nT a 0,1nT.

È proprio questa tipologia di magnetometri (tra quelli tradizionali) quella impiegata per le variazioni temporali del campo geomagnetico, delle anomalie magnetiche prodotte da corpi magnetizzati quali oggetti sepolti, relitti, giacimenti ferrosi o minerali ad alta suscettività magnetica.

Magnetometri Quantistici

Tra i magnetometri non tradizionali possiamo annoverare quelli quantistici come gli **SQUID** (*Superconducting Quantum Interference Devices*), magnetometri estremamente sensibili usati per misurare campi magnetici flebili. Gli SQUID sono costituiti da una o più giunzioni Josephson⁸ connesse tra di loro a formare un anello

⁷ In Allegato 1 – Effetto Hall

⁸ In Allegato 2 – Giunzione Josephson

chiuso superconduttivo. Le proprietà combinate dell'effetto Josephson e della quantizzazione del flusso magnetico in un anello superconduttivo chiuso fanno sì che un tale dispositivo riesca a trasformare piccolissime variazioni di flusso magnetico in un segnale elettrico facilmente registrabile. In tal modo si realizzano dispositivi SQUID capaci di misurare campi magnetici dell'ordine di qualche femto-Tesla (10^{-15}T), cioè un centi-miliardesimo del campo magnetico terrestre. Analogamente, utilizzando bobine opportune, con gli SQUID, si possono misurare correnti estremamente deboli. Gli SQUID trovano la loro principale applicazione come sensori magnetici in tutti quei casi in cui i segnali da misurare sono molto piccoli, quali le diagnostiche mediche e l'analisi non distruttiva di materiali per mezzo di correnti indotte. Il limite principale per l'utilizzo degli SQUID è la necessità di mantenere superconduttivi i materiali con cui sono formati, il che implica l'uso di temperature molto basse e di sistemi di refrigerazione complessi e costosi.

Per essere più precisi, gli SQUID misurano il flusso magnetico concatenato e la loro sensibilità è espressa in frazioni del quanto di flusso magnetico $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,0678 \times 10^{-15} \text{Tm}^2$ per unità di banda passante. La sensibilità al flusso del campo magnetico degli SQUID per strumenti commerciali è inferiore a $5 \times 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$, per frequenze al di sopra di 0,5 Hz.

La recente scoperta dei superconduttori HTS (*High Temperature Superconductors*)⁹, ha permesso di sviluppare SQUID che lavorano a temperatura relativamente più alta (77K invece di 4K), sebbene con prestazioni peggiori, il che ha in parte ridotto il problema del raffreddamento. Gli SQUID sono utilizzati anche come elementi di memoria e bistabili in circuiti digitali superconduttivi e in alcune recenti realizzazioni di bit quantistici (qubit).

⁹ I superconduttori ad alta temperatura (abbreviato in inglese HTS, acronimo di *High Temperature Superconductors*) sono materiali che si comportano come superconduttori a temperature superiori a circa 77 K (-196,2 °C), a differenza dei *superconduttori ordinari* che, a pressioni ordinarie, richiedono temperature inferiori

Capitolo 2 – La nuova frontiera dei sensori magnetometrici

Negli ultimi 10 anni le vacanze di azoto all'interno del diamante sono diventate estremamente importanti per molte applicazioni nel campo della *Quantum Technology*, nello specifico nel *Quantum Sensing*. L'estrema sensibilità di questi sensori e la loro stabilità, permette di impiegarli in molteplici ambiti come la NNMR (*Nanoscale Nuclear Magnetic Resonance*). Tali sensori, ad alta sensibilità, sono basati sul processo di informazione quantistica derivante dalle vacanze di azoto (*Nitrogen Vacancy - NV*) all'interno dei nano cristalli del diamante. Le fondamenta della tecnologia risiede nella capacità di controllare lo spin elettronico del centro della NV [1]. In particolare la lunga memoria di fase di rotazione (0.35ms) che rimane invariata anche in condizioni di temperatura ambientale, permette una valutazione molto stabile delle proprietà di rotazione dello spin, consentendone sia l'inizializzazione che la lettura istantanea con un'elevata sensibilità di misura [8].

Inoltre, le proprietà dello spin elettronico possono essere impiegate per costruire porte quantistiche che operano alla temperatura ambiente, risolvendo tutte le problematiche connesse all'impiego dei sensori magnetici basati sui dispositivi superconduttori ad interferenza quantistica (SQUID). I magnetometri basati sulla tecnologia della NV del diamante hanno un comportamento che viene influenzato dal magnetismo esterno e possono quindi essere impiegate come memorie quantistiche la cui informazione dello stato dello spin risulta coerente alla perturbazione magnetica [2].

In aggiunta, questa tipologia di magnetometri, data la irrisoria dimensione delle sonde rispetto agli SQUID, in quanto non sono necessari ingombranti sistemi di raffreddamento, risolvono anche il problema dell'applicazione in tutti quei campi dove viene richiesto una misura locale (quasi a contatto con le superfici da esaminare) e puntuale ad alta sensibilità (fino al *femto*¹⁰ Tesla) non solo dell'intensità del campo magnetico [5], ma anche della direzione di puntamento [9].

Un ulteriore vantaggio dell'impiego di magnetometri basati sulle NV del cristallo di diamante è l'alta risoluzione spaziale che può essere ottenuta (dell'ordine anche dei nanometri). Proprio grazie a queste risoluzioni è possibile rivelare delle nano particelle magnetiche all'interno di tessuti corporei per la diagnosi di metastasi tumorali [6] (senza l'impiego di particelle radioattive previste dagli approcci tradizionali) oppure possono ricreare immagini 3D se accoppiati a strumenti di rilevamento della risonanza magnetica (ODMR) [7].

Infine, tali centri di NV possono essere impiegati in un'estesa gamma di frequenze per la misura del campo magnetico oscillante che va dai rumori ambientali (ad esempio la frequenza dalla continua alla alimentazione elettrica 50/60 Hz) fino a frequenze del campo magnetico che si aggira intorno ai KHz. In questa ampia banda di lavoro non necessitano della schermatura del campo magnetico terrestre per raggiungere la massima sensibilità di misura.

¹⁰ 10⁻¹⁵

Principio di funzionamento

La struttura atomica del cristallo di diamante è rappresentata in Figura 1. I difetti del cristallo consistono nella sostituzione di un nucleo di azoto con un vuoto di posizione nel reticolo. Il centro di NV assume quindi carica negativa (il numero di elettroni dell'azoto è 7, quello del carbonio è 6).

All'interno del diamante si crea quindi un centro di vacanza dove l'asse del centro di NV, rispetto ai tre nuclei di carbonio, può

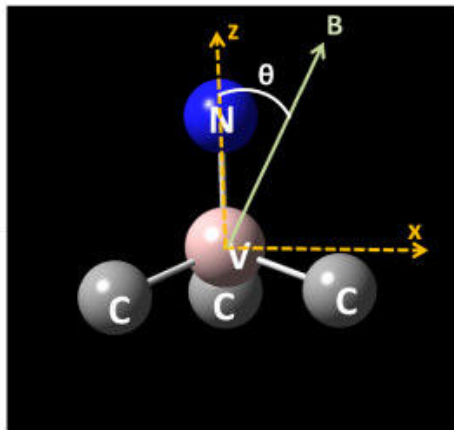


Figura 2: centro di vacanza dell'azoto

formare o un angolo $\theta = 109.5^\circ$ oppure un angolo $\theta = 54.74^\circ$ (Figura 2) a seconda della posizione che l'atomo di azoto assume all'interno del tetraedro. Le quattro possibili configurazioni sono illustrate in Figura 3 dove al centro viene

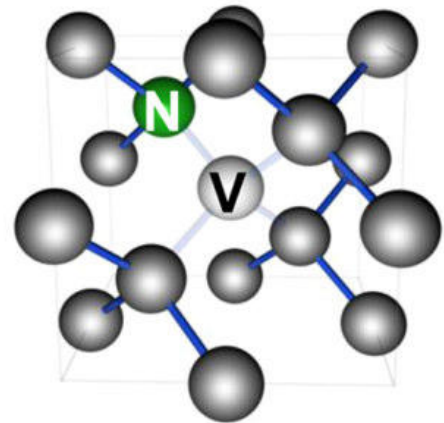


Figura 1: reticolo cristallino del diamante

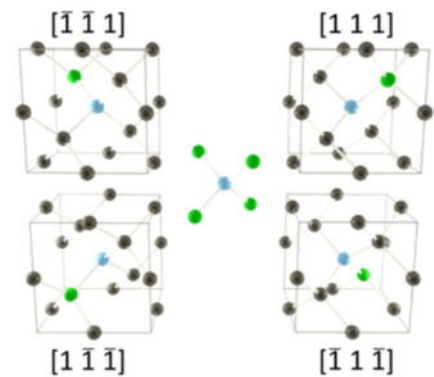


Figura 3: possibili configurazioni del centro di vacanza

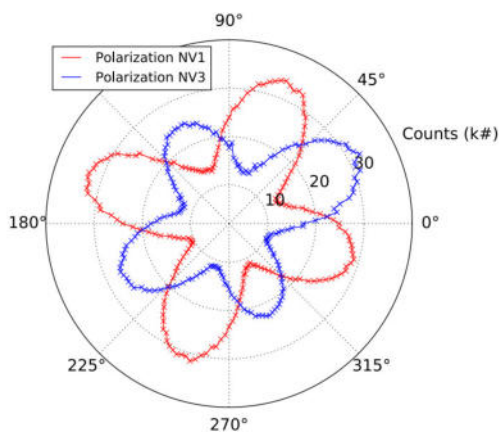


Figura 5: due possibili polarizzazioni dovute all'anisotropia della NV

presentata una rappresentazione pittorica con il NV al centro e gli atomi di azoto agli angoli del tetraedro. L'anisotropia della NV permette di differenziare due tipi di polarizzazione ortogonali (Figura 5) che possono essere individuate attraverso l'applicazione di campo magnetico generato da un magnete permanente.

Di conseguenza all'interno del cristallo di diamante si possono osservare diverse NV tali da formare un *ensemble* di risonanza dello spin elettronico che verrà influenzato dal campo magnetico esterno. Quello che verrà valutato sarà proprio l'influenza che ha il campo magnetico su tempo medio di vita della fotoluminescenza (e dunque la frequenza). Per far questo si eccita il cristallo attraverso un

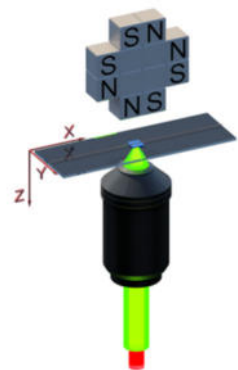


Figura 4: fascio laser verde che eccita il nano cristallo

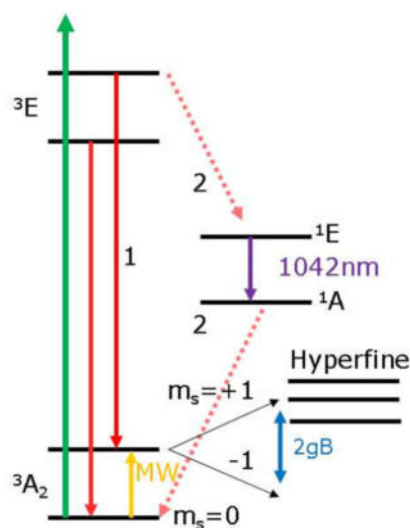


Figura 6: effetto dell'eccitazione del nano cristallo con laser verde

Il livello di *ground* della vacanza è caratterizzato da uno spin elettronico che oscilla a frequenza di 2.87 GHz (MicroWave – MW - in Figura 6) tra il livello $m_s=0$ e $m_s=\pm 1$. Tuttavia, se la vacanza viene stimolata dal *laser* nella banda del verde a 532nm allora la vacanza passa dal livello *ground* $^3A_2(|0\rangle)$ a livello "eccitato" $3E(|1\rangle)$ [5]. Gli elettroni del centro NV possono così decadere in due modi. Il primo modo, individuato dal percorso numero 1 in Figura 6, prevede l'emissione di energia luminosa nella banda del rosso a 637nm con il ritorno dallo stato eccitato $3E(|1\rangle)$ allo stato *ground* $^3A_2(|0\rangle)$. Tuttavia, se viene applicato un segnale a microonde alla frequenza di 2,87 GHz (stessa frequenza di oscillazione dello spin) si osserva uno spostamento dallo stato $m_s=0$ allo stato $m_s=\pm 1$. Ciò acconsentirà al secondo modo (percorso numero 2) di decadimento dopo l'eccitazione con il fascio di pompa a 532nm verso uno stato intermedio $^1E \rightarrow ^1A$ con relativa emissione debole di luce infrarossa a 1042nm e spostamento della risonanza a microonde dal valore centrale di 2.87GHz. Questo fenomeno prende il nome di risonanza

magnetica rilevata otticamente (ODMR) e produce uno *shift* della frequenza di risonanza in due righe frequenziali (effetto Zeeman¹¹ a causa della presenza di un campo magnetico) dovuti agli stati $m_s = \pm 1$. In entrambi i casi la ODMR verrà misurata attraverso un fotodiodo che avrà il compito di contare il numero di fotoni e dunque misurare l'emissione del segnale di fotoluminescenza.

Servirà ora un sistema per valutare come varia la risonanza dello spin elettronico. Ciò potrà essere fatto immettendo nel cristallo con la NV un segnale a microonde che varia la sua frequenza a piccoli *step* (ad esempio 0.3 MHz). Al fine di valutare correttamente il picco di risonanza della fotoluminescenza catturata dal fotodiodo, sarà integrata per un notevole numero di scansioni. Quello che verrà fatto a questo punto sarà variare il campo magnetico esterno (sia in ampiezza che in orientamento) applicato *all'ensemble* di NV.

Un esempio di tale misura di risonanza dello spin elettronico è rappresentato in Figura 8 dove si valuta l'influenza del campo magnetico statico in relazione al picco di risonanza della fotoluminescenza

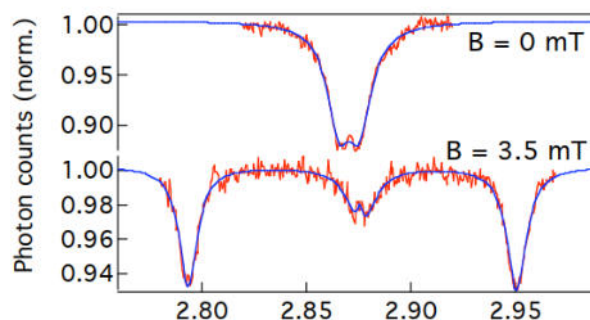


Figura 8: esempio di misura di risonanza dello spin elettronico

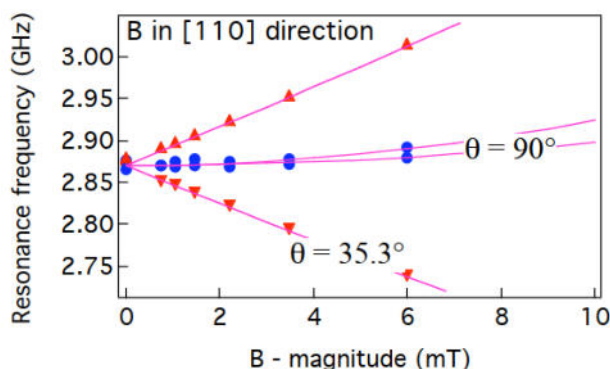


Figura 7: variazione della frequenza di risonanza in funzione della magnitudo del campo magnetico

catturata dal fotodiodo. È possibile notare come, anche senza applicare un campo magnetico esterno, si osserva un calo della luminescenza alla frequenza di 2.87 GHz dovuto alla rotazione dello spin elettronico dallo stato zero allo stato ± 1 . Applicando un campo magnetico esterno si nota come il picco di risonanza si divida in due (Figura 8) a causa dell'effetto Zeeman già precedentemente sottolineato. In questo caso la luminescenza decresce a causa della transizione dello spin elettronico dallo stato 0 allo stato -1 e dello stato

¹¹ L'effetto Zeeman è un fenomeno che consiste nella separazione delle linee spettrali a causa di un campo magnetico esterno. Si osserva che ciascuna riga si scinde in più righe molto vicine, a causa dell'interazione del campo magnetico con i momenti angolare e di spin degli elettroni.

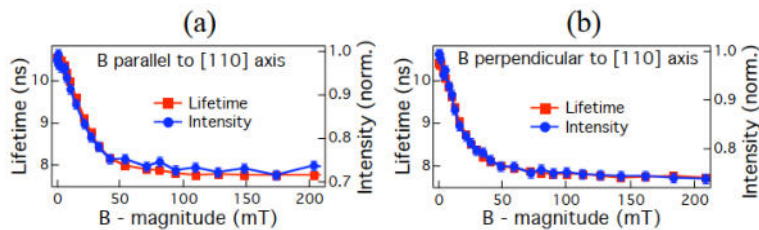


Figura 9: variazione del lifetime in funzione della magnitudo del campo magnetico

persistenza della fotoluminescenza rivelata dal diodo fotorivelatore ("lifetime"). Applicando un campo magnetico si osserva che il tempo di persistenza della fotoluminescenza (che si ricorda esse dovuta alla transizione dallo stato $m_s=0$ a $m_s=\pm 1$) risulta anch'esso essere funzione della magnitudo del campo magnetico. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (a) e (b) è possibile valutare questa relazione in funzione della magnitudo del campo magnetico e per due direzioni tra loro ortogonali del campo magnetico.

Tuttavia, la variazione della frequenza di risonanza dipenderà anche dall'angolo tra il centro di NV ed il campo magnetico applicato che nel caso specifico risulta di 90° e 35.3° [2]. In sostanza l'effetto Zeeman non dipende però solo dalla magnitudo del campo magnetico, ma dipende anche dall'orientamento spaziale.

Supponendo di mantenere costante in modulo il campo magnetico variando l'orientamento e tenendo fissa la distanza tra il generatore di campo magnetico e il centro di NV (si variare l'orientamento del campo magnetico intorno ad un asse $[1\ 0\ 0]$, facendo in modo che il campo giaccia comunque nel piano rappresentato in Figura 10), sarà possibile ancora una volta valutare le frequenze di risonanza dello spin elettronico. Anche in questo caso si valuta l'influenza del campo magnetico statico (costante in intensità, ma variabile in direzione) in relazione al picco di risonanza della fotoluminescenza catturata dal fotodiodo (Figura 11). Prendendo un sistema di riferimento dove A è l'origine dell'asse cartesiano degli angoli, è possibile tracciare 4 curve (1 per ogni posizione del centro di NV) in cui sono evidenti le variazioni di frequenza dei risonanza dello spin elettronico.

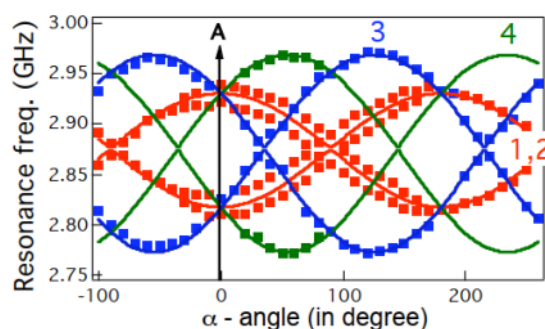


Figura 11: influenza della direzione del campo magnetico sulla frequenza di risonanza dello spin

Ricapitolando dunque, nell'assunzione che il campo magnetico si mantenga costante in direzione, vi è la possibilità di legare la variazione di magnitudo del campo magnetico alla misura della frequenza di risonanza

0 allo stato $+1$. La frequenza di questi picchi di risonanza dipenderanno dalla magnitudo del campo magnetico (mantenendolo costante in una direzione) secondo una legge ben visibile in Figura 7. Gli effetti della variazione della magnitudo del campo magnetico incidono non solo sulla frequenza di risonanza, ma anche sul tempo di

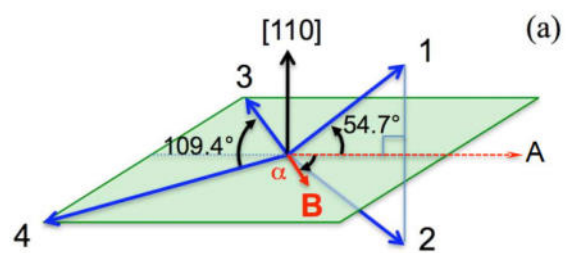


Figura 10: geometria dell'asse di NV

Va sottolineato che le relazioni tra frequenza di risonanza e variazione dell'angolo di puntamento del campo magnetico sono valide se il campo magnetico si muove in un piano perpendicolare all'asse del reticolo del diamante. Quando il campo magnetico si muove in questo piano è possibile anche valutare un legame tra angolo di puntamento del campo magnetico e tempo di vita della fotoluminescenza della NV. La relazione è ben visibile in Figura 12.

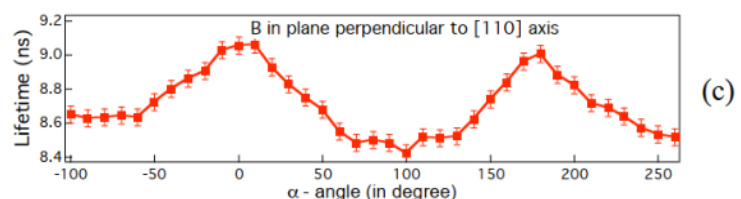


Figura 12: legame tra angolo di puntamento del campo magnetico e lifetime

dello spin elettronico delle NV del diamante. Nel caso in cui il campo magnetico si mantenga costante in magnitudo, ma vari nel suo orientamento, è possibile legare, allo stesso modo, anche la variazione dell'orientamento del campo magnetico alle frequenze di risonanza dello spin elettronico. In entrambi i casi la misura della frequenza di risonanza dello spin elettronico sarà assicurata immettendo nel cristallo con la NV un segnale a microonde che varia la sua frequenza a piccoli *step* determinando correttamente il picco di risonanza della fotoluminescenza (opportunamente integrata per un certo numero di scansioni) catturata da un fotodiodo.

In aggiunta, gli stessi studi portano a valutare relazioni sul *lifetime* del NV *ensemble* che, a sua volta, possono essere impiegate per rivelare campi magnetici esterni senza che vi sia bisogno di antenne a microonde (ovvero senza lavorare sulla discriminazione della frequenza di risonanza).

Schema di realizzazione e valori di sensibilità di un magnetometro basato sul centro di NV del diamante

Uno schema di massima di sensore magnetico basato su questa tecnologia è raffigurato in Figura 13. Un laser a 532 nm eccita un centro di NV del cristallo di diamante attraverso un fascio di pompa che viaggia attraverso

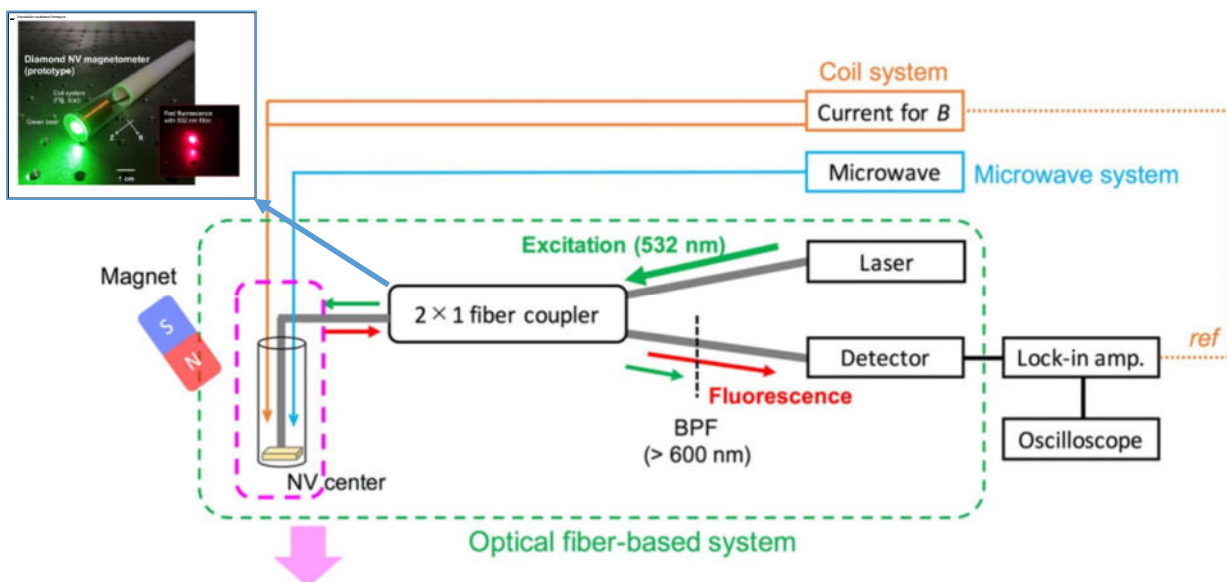


Figura 13: schema di massima di un magnetometro basato su NV del diamante

una fibra ottica. Oltre al laser, il centro di NV è investito anche da un segnale a microonde che sarà possibile regolare a piccoli *step* al fine di poter valutare correttamente il picco di risonanza della fotoluminescenza che verrà catturata dal fotodiodo ed integrata per un notevole numero di scansioni.

Come detto in precedenza, il centro di vacanza NV genererà un fascio luminoso nel rosso le cui variazioni di intensità (Figura 14) saranno rivelate da un sistema in cascata costituito da un detector, un amplificatore ed un oscilloscopio. Un dispositivo a magneti permanenti di test, posizionato in prossimità del cristallo, produrrà dei cali di intensità nella fluorescenza rossa che verranno rivelati dall'oscilloscopio.

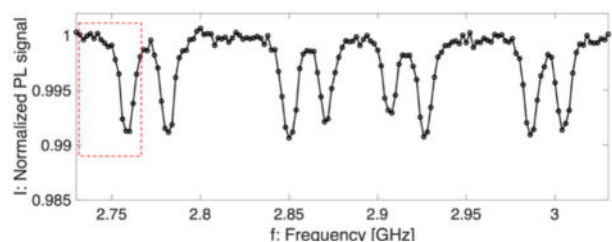


Figura 14: variazioni di intensità del fascio luminoso

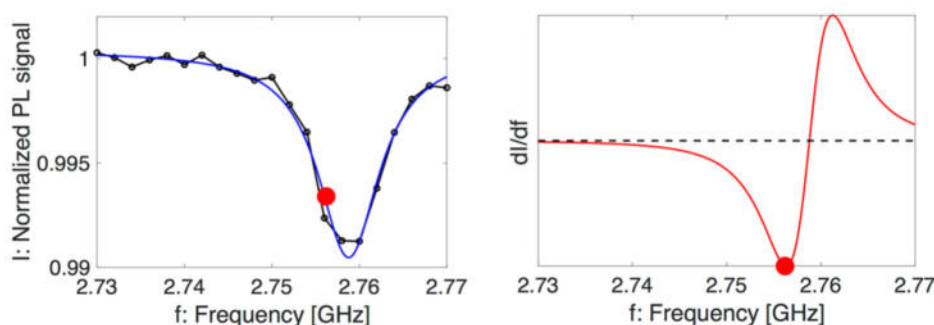


Figura 15: frequenza a cui si riscontra la massima caduta di intensità

In Figura 14 è rappresentato un esempio dell'uscita dell'oscilloscopio dove sono visibili ben 8 cali d'intensità del laser rosso prodotti proprio dal magnete di test. L'applicazione di un campo magnetico costante serve ad estrarre uno dei 4 assi

possibili di orientamento del centro di NV. Infatti i quattro assi di orientamento producono 2 coppie da 4 cadute di intensità (le cadute di intensità sono simmetriche) in quanto un campo magnetico continuo e costante produce tale fenomeno visibile al rivelatore ottico di risonanza magnetica (ODMR). **Quello che verrà fatto è impiegare la caduta di intensità più grande per la misura di campi magnetici esterni, ovvero si analizzerà la luce rossa nel punto di massima pendenza in maniera tale che ogni minima variazione di campo magnetico indotto (proveniente dall'esterno) produce una massima variazione di fluorescenza che potrà più facilmente essere osservata.** A titolo di esempio, nel grafico in Figura 14 la caduta di intensità maggiore si riscontra alla frequenza 2.7562 GHz come mostrato nell'ingrandimento in Figura 15, frequenza che si riscontra sempre con l'impiego di magneti permanenti tra 0.7 e 4.4 mT.

Tuttavia, un approfondimento va fatto sulle limitazioni in termini di sensibilità di misura che sono intrinseche del dispositivo [5]. Il centro di NV del diamante è fondamentalmente limitato da un elevato rumore di fondo che si genera durante la transizione dallo stato 3E allo stato 3A_2 e che produce variazioni anche dell'1-3% nell'intensità della radiazione luminosa rossa. Tale rumore di fondo può essere limitato **aumentando il numero di centri NV** (impiegando dunque una massa di nano cristalli di diamante) ed **aumentando la potenza della radiazione di ingresso di colore verde** (fino al valore dell'ordine dei Watt).

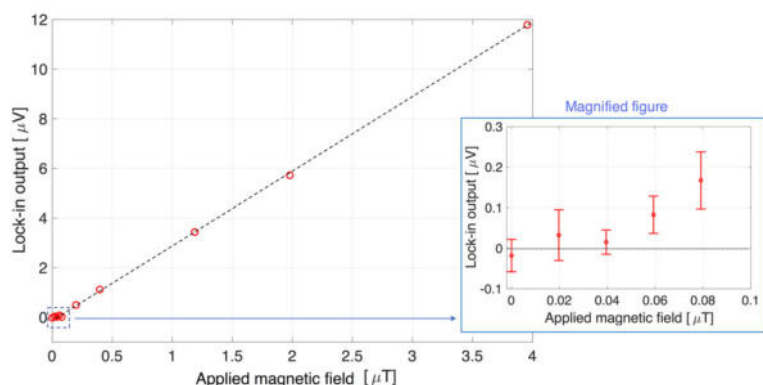


Figura 16: sensibilità di misura del sensore magnetico

Ma con quale sensibilità di rilevamento riesce a misurare il sensore? Si suppone a questo punto di aggiungere un campo magnetico di natura alternata nell'intorno del punto in cui si riscontra la maggiore caduta di intensità ($f=2.7562$ GHz) tale per cui si riesca a dosare l'intensità del campo magnetico esterno in valor di pochi centesimi di μT (Figura 16).

In una tale situazione, la sensibilità minima del campo magnetico rivelabile risulta essere di pochi nT. Tuttavia, impiegando un sistema di bobine (Figura 17), all'interno del magnetometro che vadano a cancellare gli effetti del segnale a microonde impiegato per la misura della frequenza di risonanza è

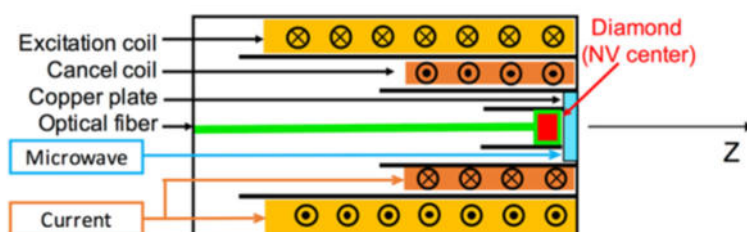


Figura 17: bobine di cancellazione del segnale a microonde

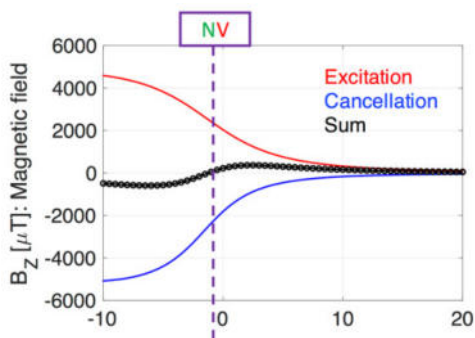


Figura 18: cancellazione del rumore interferente

possibile andare a cancellare il rumore interferente (Figura 18) generato (che sarà anch'esso un campo magnetico), ottenendo una sensibilità di misura dell'ordine dei pico T (10^{-12}) e fT (10^{-15}).

In conclusione, sensori di questo tipo (attraverso opportuni accorgimenti come l'aumento dei centri di NV, l'aumento della potenza di radiazione di ingresso di colore verde e l'impiego di bobine di cancellazione) possono rivelare campi magnetici molto piccoli. Dunque, un siffatto sistema si presta sicuramente per applicazioni in campo biomedico per rilevare la presenza di Nano Particelle Magnetiche (MNP).

Nondimeno, attraverso opportune adattamenti, potrebbe

essere impiegato anche in applicazioni nell'ambito della difesa militare per la rivelazione di piccole perturbazioni magnetiche prodotte dalla presenza di oggetti metallici in acqua, in quanto, come si vedrà in seguito, tali sensibilità risultano ampiamente sufficienti per rilevare la presenza dei più moderni sottomarini in scafo "amagnetico".

Esempio di realizzazione pratica del sensore

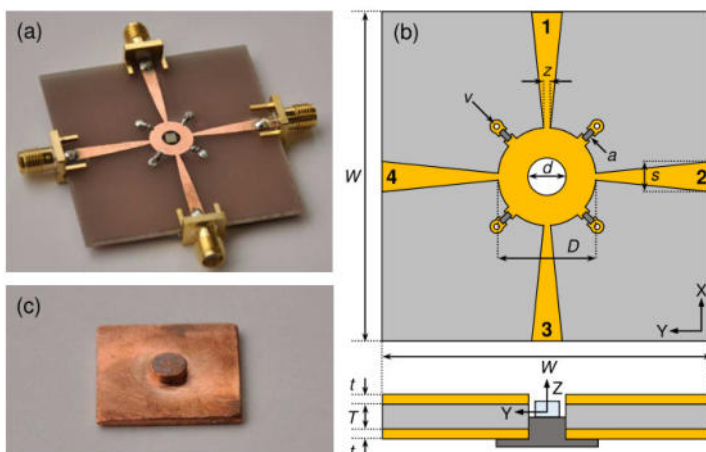


Figura 20: esempio di realizzazione pratica

Un esempio di realizzazione pratica di come poter creare un circuito per la misura ad alta sensibilità del campo magnetico attraverso le NV del diamante del sensore [1] è visibile in Figura 20. Si parte con la realizzazione di un circuito risuonatore (Figura 20 (a)) consistente in una cavità connessa con quattro *striplines* di rame ognuna caricata elettricamente tramite un condensatore di capacità 1.1 pF. Il tutto è connesso al back side attraverso 4 punti di giunzione ed inoltre, solo le porte 1 e 2 (Figura 20 (b)) sono connesse al generatore a microonde mentre le porte 3 e 4 risultano connesse a

terminazioni resistive di 50 Ω . All'interno della cavità si trova un diamante (dimensioni 2,5 x 2,5 x 0,5 mm) con funzione ODMR (*Optical Detected Magnetic Resonance*) poggiato su una base di rame che genera un campo magnetico permanente continuo di $B_{dc}=1.9$ mT (rientrante quindi nel range 0.7 e 4.4 mT) che a sua volta risulta connesso con il *ground* elettrico (dimensione del lato $D=10$ mm). Durante il normale funzionamento del generatore a microonde, si suppone sia presente un campo magnetico alternato B_{ac} oggetto della misura. Sarà possibile constatare quanto teoricamente prospettato precedentemente in termini di riduzione della luminescenza intorno alla frequenza di 2.8 GHz (Figura 19).

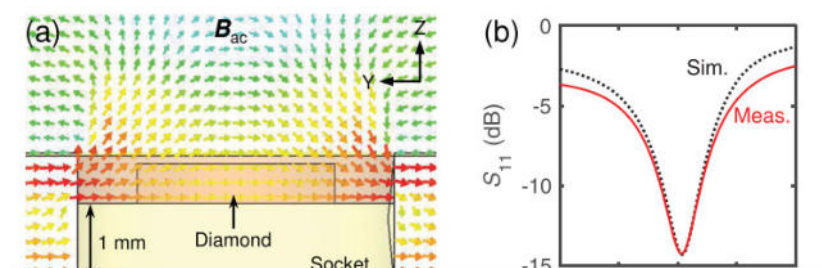


Figura 19: riduzione misurata della luminescenza

Per testare quindi le prestazioni del ODMR basato sulle NV del diamante si impiega un circuito rappresentato in Figura 21 dove nella parte “grigia” viaggia un segnale a microonde, mentre nella parte “gialla” un segnale ottico. Un laser che lavora nella banda del verde emette un fascio luminoso a 532 nm che eccita le vacanze del diamante. Quest'ultimo emette fotoni nella banda del rosso che vengono conteggiati da un fotodiodo a valanga (APD in Figura 21).

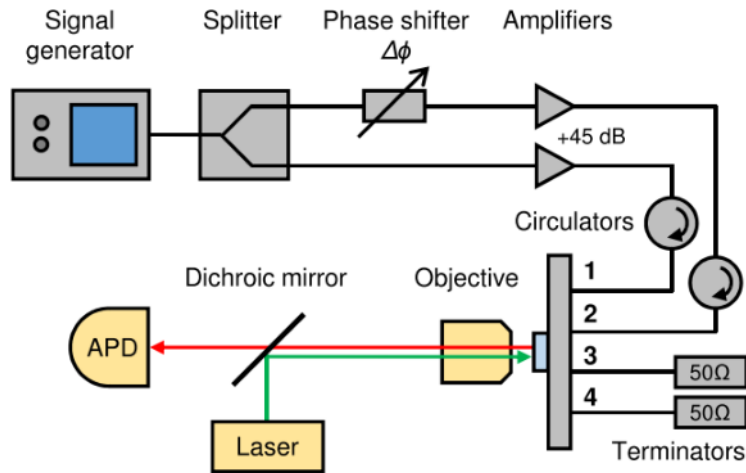


Figura 21: schema circuitale del risuonatore

permanente (ingresso 2) che tuttavia, essendo sfasato in angolo risulta in modulo più debole. La coppia di frequenze più interne sono dovute al fatto di avere un campo magnetico orientato a 90 gradi rispetto a quello statico e dunque lo *shift* frequenziale è dovuto semplicemente ad un diverso orientamento.

Concentrandosi momentaneamente sulle frequenze più esterne è evidente come, controllando lo sfasamento (anche di un minimo valore) del generatore di segnale, è possibile modificare lo spettrogramma in Figura 22, allontanando o avvicinando le frequenze più esterne rispetto alla frequenza centrale di 2.87 GHz. Ciò implica che segnali generati che differiscono per piccole differenze di polarizzazione possono essere rivelati con grande accuratezza dal circuito risuonatore in Figura 21.

Contestualmente nella parte grigia a microonde un generatore di segnale immette ai due ingressi del risuonatore due forme d'onda che differiscono solo per una differenza di fase. Proprio questa differenza di fase determinerà uno sdoppiamento della frequenza a cui si ha la riduzione di luminescenza che non sarà più a 2.87 GHz, ma a frequenze diverse centrate ed equispaziate rispetto a 2.87 GHz (Figura 22). La coppia di frequenze più esterne sono dovute al campo magnetico parallelo a quello

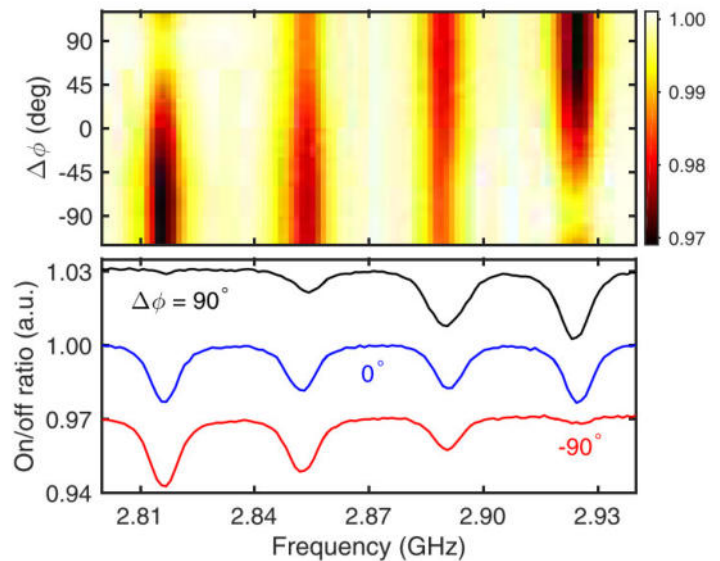


Figura 22: shift frequenziale dovuto al diverso orientamento del campo magnetico

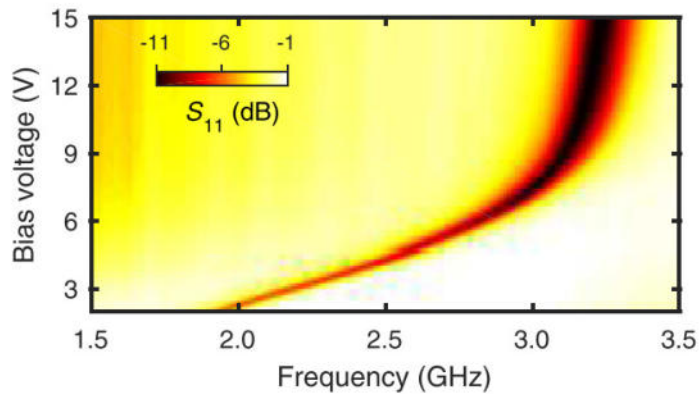


Figura 23: cambio della frequenza centrale di lavoro

In aggiunta, si potrebbe pensare di cambiare la frequenza centrale di lavoro del circuito risonatore variando la capacità delle quattro striplines con ad esempio un diodo *varactor*. Il risultato che si ottiene è uno *shift* della frequenza centrale di risonanza tra 2.0 e 3.2 GHz (Figura 23), variazione che permette di affermare che il circuito è in grado di provvedere ad una misura di campo magnetico arbitrariamente polarizzato e che oscilla in una larga banda di frequenza.

In conclusione, il circuito, di dimensione estremamente ridotte, dell'ordine di pochi cm, è quindi un'ottima base di partenza per gli studi di *Quantum Sensing* utilizzando le vacanze di azoto all'interno del diamante applicata alle misure di campo magnetico in un elevato range di frequenze.

Possibili applicazioni: dalla risonanza magnetica all'imaging di oggetti

I magnetometri basati sulle NV dei nano cristalli di diamante possono essere impiegati in campi di applicazione dove la misura della perturbazione magnetica è altamente sfidante, ponendosi come obiettivo il vero e proprio *imaging* magnetico dell'oggetto da rivelare. Tuttavia, bisogna tenere a mente che il campo magnetico di un singolo dipolo decresce in funzione della distanza di un fattore $\frac{1}{r^3}$ e, pertanto, sarà fondamentale valutare anche piccolissime perturbazioni magnetiche anche dell'ordine dei femto Tesla.

Ad oggi le applicazioni più immediate dei magnetometri basati su NV sono sicuramente quelle legate alle risonanze magnetiche mediche dove si trattano molecole organiche con densità di protoni elevate ($10^{22} \div 10^{23}/\text{cm}^3$). In questo caso, misurare la proiezione del singolo spin richiederebbe una notevole risoluzione spaziale, ma, mettendo un magnete vicino alla superficie (a similitudine di quanto fatto per le risonanze magnetiche), in grado di produrre un campo magnetico 10^6 T/m , il sensore sarebbe in grado di determinare spettralmente due protoni separati da una differenza minima di campo di magnetico con una risoluzione spaziale di 0.1 nm. Ciò implica che la rilevazione individuale del protone può essere possibile anche su sostanze organiche ad elevata concentrazione come le molecole biologiche [4]. Più in generale, l'impiego dei magnetometri basato sulle NV dei nano-cristalli di diamante consente il rilevamento di variazioni su scala nanometrica delle sostanza chimica.

Tuttavia, impiegare i magnetometri a NV del diamante per scopi di *imaging* della struttura molecolare di campioni biologici e oggetti, pone il problema di dover cancellare il rumore magnetico interferente prodotto dai trasformatori di rete elettrica, dai cablaggi, dall'innesco di pompe, di ventole ecc. [5]. Ciò non di meno, risulta difficile eliminare interferenze magnetiche (ampiamente percepibili dal cristallo che ha una banda fino ai KHz e operante a fT / VHz di sensibilità) a così bassa frequenza (50 – 60 Hz fondamentale o sue armoniche) perché ciò significherebbe disporre il cristallo all'interno di una custodia eccessivamente grande. Ciò che viene fatto è quindi cancellare i segnali interferenti dopo la FFT, impiegando filtri digitali (Figura 24).

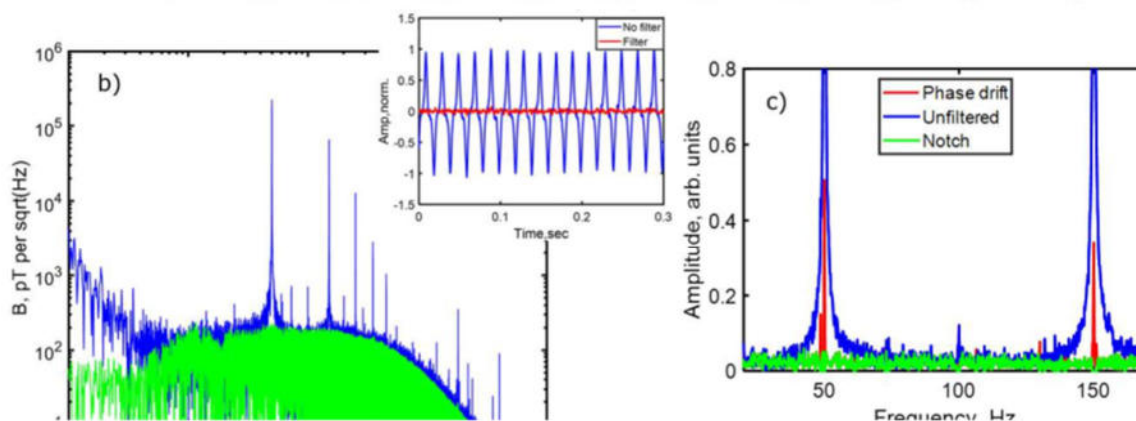


Figura 24: filtri digitali per la cancellazione del rumore interferente

Un tale filtro deve adattarsi a qualsiasi deriva dalla frequenza di rete ed essere in grado di catturare qualsiasi rumore transitorio (ad esempio da una ventola o accensione e spegnimento della pompa). In applicazioni di tipo biomedico tali frequenze non saranno di interesse e verranno cancellate, ma **in altre possibili future applicazioni come il rilevamento di oggetti subacquei, proprio tali rumori magnetici transitori saranno l'obiettivo della ricerca.** Andrà comunque valutato l'effetto schermante che avrà la colonna d'acqua sul sensore. Assumendo infatti che l'ampiezza del campo magnetico decresca in funzione della distanza di un fattore $\frac{1}{r^3}$, la perturbazione magnetica prodotta da un semovente marino alla quota di 100 metri subirà una attenuazione in intensità di 60 dB. Se ad esempio il campo magnetico a 100 metri di quota risulta 100nT, in superficie sarà più piccolo di un fattore pari ad un milionesimo ovvero dell'ordine dei 100 fT.

Alla luce di quanto sopra, si ritiene che il successivo passo sarà determinare il rivelamento magnetico su scala metrica adeguatamente "fine" per poter impiegare il sensore anche nell'ambiente fisico. Per ottenere questo risultato bisognerà ragionare con una massa di centri di NV in quanto un "macroscopico" diamante contenente molti centri può essere utilizzato come strumento di misura del campo magnetico per l'elaborazione di immagini ad alta sensibilità e notevole risoluzione spaziale. Ad esempio, supponendo di considerare un cristallo di diamante con un'alta densità di centri di NV collegato ad un *Charge Coupled Device* (CCD¹²) i cui pixel corrispondono a $\sim (1\mu\text{m}^3)$ di volume del cristallo e, ripetendo i ragionamenti sulla sensibilità di una massa di nano cristalli di diamante fatti precedentemente, si potrebbero ottenere delle *performances* dell'ordine dei millimetri nella risoluzione spaziale del campo magnetico [4], valore pienamente rispondente all'esigenza di effettuare un *imaging* del campo magnetico dell'ambiente fisico esterno. Inoltre, maggiore sarà la dimensione del sensore, più elevate saranno le *performances* in termini di sensibilità complessiva (fino ai femto Tesla/ $\sqrt{\text{Hz}}$).

¹² CCD (acronimo inglese di *Charge Coupled Device*) è un dispositivo ad accoppiamento di carica collegato con una speciale fotocamera elettronica il cui cuore è costituito da una piastrina di silicio sensibile alla luce. Un sensore CCD è formato essenzialmente da una matrice di elementi fotosensibili, chiamati pixel, di dimensioni variabili e di forma quadrata o rettangolare, disposti a scacchiera sulla superficie di un cristallo di silicio opportunamente trattato ed integrato in un dispositivo denominato chip

Capitolo 3 – Importanza della magnetometria nelle applicazioni militari

Le perturbazioni magnetiche prodotte dalle navi militari e dai sottomarini sono da sempre state un *elemento di criticità* per tutte le Marine. Basti pensare che per scopi difensivi, vengono impiegati array di magnetometri posti sui fondali marini in posizioni strategiche (cioè intorno ai porti o nei *choke point*) per monitorare l'attività dei sottomarini. L'oneroso programma dei sottomarini russi costruiti in titanio (metallo amagnetico) nasce proprio per contrastare tali sistemi. Più in generale, i sottomarini militari vengono smagnetizzati, passando, ad intervalli regolari, attraverso strutture create *ad hoc* per aiutarli a sfuggire al rilevamento da parte di sistemi di monitoraggio del fondo marino, rilevatori di anomalie magnetiche e mine innescate magneticamente. Tuttavia, i sottomarini difficilmente potranno essere completamente smagnetizzati, in quanto, seppur ridotta, avranno sempre una piccola percentuale di magnetismo residuo che potrebbe essere almeno in linea teorica, rivelata da moderni sensori quantistici.

Il campo magnetico terrestre

La Terra ha un notevole campo magnetico, che genera forze complesse che hanno incommensurabile effetto sulla vita quotidiana degli animali e dell'uomo. Il campo magnetico terrestre esiste a causa del suo nucleo. Il nucleo è costituito da metalli fusi surriscaldati e delle leghe con momenti magnetici fluttuanti sotto forte pressione. Poiché i metalli fusi sono in contatto elettrico tra loro, la corrente scorre tra di loro, generando un campo magnetico e crea la magnetosfera.

Le proprietà di trasporto elettronico e termico del nucleo terrestre sono cruciali per il campo magnetico terrestre. Questo campo ha sia un polo nord che un polo sud, che possono essere utilizzati per scopi di navigazione, anche se tali subiscono sensibili derive [10]. Variazioni nella corrente elettrica hanno fatto sì che i poli magnetici possano migrare fino a 16 km l'anno a causa dell'interazione tra campo magnetico terrestre e la rotazione nel nucleo del pianeta e relative correnti elettriche. L'intensità del campo magnetico terrestre è in realtà abbastanza irregolare nonostante la simmetria generale indicata nella Figura 25. In effetti, l'intensità del campo varia lentamente a velocità diverse secondo la posizione sulla superficie terrestre. Il campo crea quindi la magnetosfera che, nel girare, protegge il pianeta dalla radiazione solare dannosa per la vita sulla Terra. Infatti, senza di essa, la superficie del pianeta sarebbe bombardata da un numero maggiore di particelle solari, mettendo in pericolo le reti elettriche, i satelliti e aumentando l'esposizione umana a livelli più elevati di radiazioni ultraviolette.

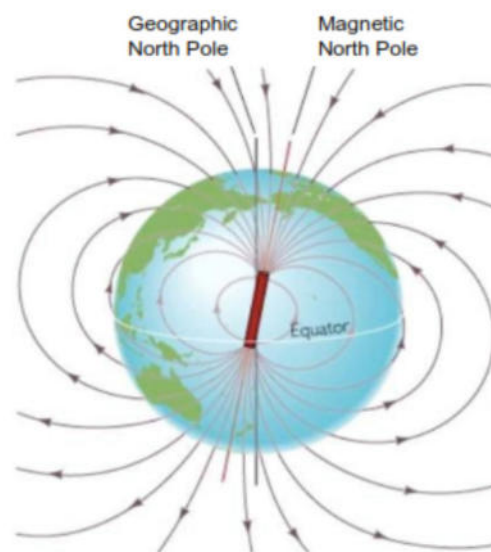


Figura 25: la magnetosfera terrestre

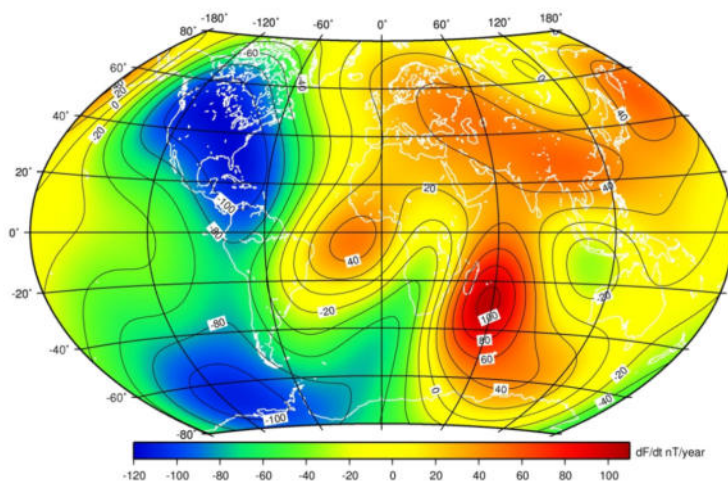


Figura 26: tasso di variazione del campo magnetico terrestre

Negli ultimi 400 anni circa, gli esseri umani hanno misurato il campo magnetico terrestre, notando uno spostamento verso ovest. La Figura 26 mostra la mappa del tasso di variazione annuo previsto dell'intensità totale del campo magnetico terrestre nel periodo 2015÷2020. Ciò implica movimenti del nucleo terrestre manifestati dalle anomalie rivelate da queste misurazioni di declinazione magnetica che attestano la tendenza del polo magnetico a muoversi verso ovest.

Le firme magnetiche di qualsiasi oggetto si formano a causa dell'interazione dei componenti ferromagnetici dell'oggetto

con il campo magnetico terrestre. Tuttavia, è importante capire che esistono due diversi tipi di magnetismo, che possono essere classificati in magnetismo permanente (o residuo) e magnetismo indotto. Il magnetismo permanente di un oggetto si genera dai componenti ferromagnetici (ferro, nichel, cobalto, alcune leghe di terre rare e alcuni minerali naturali come la magnetite) intrinseci del materiale che generano un proprio campo magnetico autonomo. Il magnetismo indotto è, invece, quello che risponde alla legge di Faraday-Neumann, ovvero una variazione di flusso del campo magnetico che attraversa un circuito, legata semplicemente alla sue proprietà di conduttività.

Naturalmente un qualsiasi materiale sulla Terra sarà soggetto anche al campo magnetico terrestre e, in funzione della sua permeabilità magnetica¹³, vi sarà un effetto combinato delle proprietà magnetiche del materiale con il campo magnetico terrestre presente in una determinata posizione del globo. Più specificamente, quando la permeabilità magnetica del materiale è più

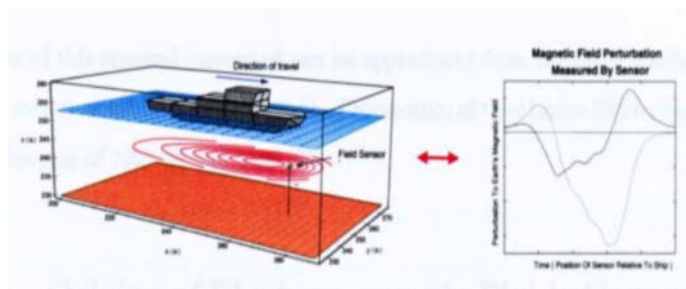


Figura 27: effetto dell'interazione tra campo magnetico terrestre con un oggetto ferroso

forte (nel ferro, cobalto o nichel in presenza della campo magnetico terrestre, si ha un effetto combinato che tende enfatizzare il campo magnetico complessivo prodotto dall'oggetto, generando la cosiddetta firma magnetica dell'oggetto (Figura 27).

La firma magnetica di un "bersaglio" navale o un sottomarino può essere paragonata alle impronte digitali che identificano gli esseri umani. L'importanza di questa firma era già nota dall'inizio del secolo scorso e proprio su queste peculiarità sono stati progettati sistemi di difesa come le mine subacquee per il rilevamento ed affondamento delle navi e dei sommergibili durante la seconda guerra mondiale. In parallelo, durante il 21° secolo, come contromisura, sono state adottati sempre maggiori



Figura 28: unità cacciamine a ridotta segnatura magnetica

¹³ Nell'elettromagnetismo, la "permeabilità magnetica" di un materiale è una grandezza fisica che esprime l'attitudine del materiale a magnetizzarsi in presenza di un campo magnetico.

accorgimenti nella costruzione di navi e sottomarini con l'impiego di materiali come la vetroresina per le Navi Cacciamine (Figura 28) e metalli amagnetici per i moderni sottomarini (Figura 29).



Figura 29: sottomarino classe U212A in scafo amagnetico

La segnatura magnetica delle unità navali

Le navi sono principalmente costituite in acciaio, di conseguenza il loro passaggio influenza localmente il campo magnetico. A causa quindi dell'effetto distorsivo del campo magnetico, una nave militare può facilmente essere rivelata magneticamente, impiegando degli strumenti progettati per rilevare proprio tali distorsioni. Non a caso durante la 2^a guerra mondiale, i tedeschi introdussero le mine magnetiche, poco costose ed altamente efficaci poiché letali se collegate con degli esplosivi. La maggior parte delle mine navali sono infatti effettivamente progettate per essere attivate quando il campo magnetico che li circonda viene perturbato il che, in mare, si verifica solo quando grandi quantità di materiale ferromagnetico, come le navi o i sottomarini, passano sopra la loro testa.

Tuttavia, è bene approfondire più nel dettaglio da dove ha origine questa perturbazione che non è solo data dall'interazione della struttura della Nave (o Sottomarino) con il campo magnetico terrestre, ma vanno evidenziati almeno altri 3 fattori, di minore incidenza, ciò non di meno ugualmente importanti:

- l'impiego delle protezioni catodiche (ad es. zinchi) per il controllo della corrosione della superficie metallica del natante;
- le correnti parassite nello scafo durante il movimento di rollio/beccheggio/imbardata dovuto al moto ondoso;
- i campi elettromagnetici dispersivi generati dalle apparecchiature elettriche e dai cavi all'interno della piattaforma natante.

Tralasciando i contributi sopra esposti e valutando per il momento quello dovuto all'interazione della struttura del natante con il campo magnetico, va ricordato inoltre che il "comportamento" magnetico dell'acciaio non è costante nel tempo. Ciò è dovuto al cosiddetto fenomeno dell'**isteresi**, ovvero la memoria magnetica dell'acciaio che cambia in funzione della storia di magnetizzazione del materiale dipendente dal campo magnetico di fondo a cui è soggetto il materiale.

La complessità della materia è evidente se, oltre ai fenomeni di isteresi, si prendono in considerazione anche quelli **meccanici** presenti ad esempio nei sottomarini sottoposti a forze di strizione durante le fasi di immersione a quota profonda. Un metallo, soggetto a tali sollecitazioni modifica la propria curva di isteresi e, di conseguenza, rende il comportamento del materiale difficilmente prevedibile dal punto di vista della caratterizzazione magnetica.

A causa delle suddette variabili da tenere in considerazione nel computo della segnatura magnetica delle unità navali militari (sia di superficie che subacquee), periodicamente tali unità subiscono un processo di *deperming*¹⁴ per cercare di ridurre il magnetismo permanente dello scafo.

¹⁴ Il *deperming* è il procedimento con il quale si elimina la carica magnetica di un oggetto, sia di natura metallica ferrosa che di altra natura; il procedimento è usato, ad esempio, per la creazione di acciaio amagnetico, come anche sullo scafo di un'unità navale, per renderla meno individuabile da mine magnetiche.

Simulazione e predizione della firma magnetica

Mano a mano che i sensori magnetici sono diventati sempre più performanti, si è sentita la necessità di valutare e predire con sempre più esattezza la firma magnetica dell'unità navale o del sottomarino. Ad esempio, fino a che le mine erano in grado di rivelare le variazioni di campo magnetico solo sul piano verticale, ci si concentrò solo sui sistemi di smagnetizzazione delle navi da guerra che riducevano le perturbazioni solo su quel piano. A mano a mano che furono sviluppate mine multi-asse, anche i sistemi di smagnetizzazione si adattarono a lavorare su tre dimensioni. Divenne quindi importante misurare esattamente la firma magnetica della piattaforma per ridurre il rischio di essere rilevati.

In generale, esistono due metodi per determinare la firma magnetica: mediante la misurazione fisica sul campo oppure mediante la simulazione. Ovviamente il primo metodo è sicuramente più preciso, ma comporta un oneroso impegno logistico ed economico per attuarlo. Il secondo metodo, la simulazione (Figura 30), è invece più economico ed ha il grande vantaggio di poter esser effettuato in fase preliminare alla costruzione della piattaforma, progettando lo scafo in maniera da ottimizzare anche la segnatura magnetica. La simulazione, tuttavia, dovrà essere validata sempre dalla misura fisica, in quanto difficilmente potrà raggiungere una simile fedeltà di misura, anche in relazione al fatto che andrà simulato l'effetto dell'interazione del campo magnetico generato dalla piattaforma con quello terrestre.

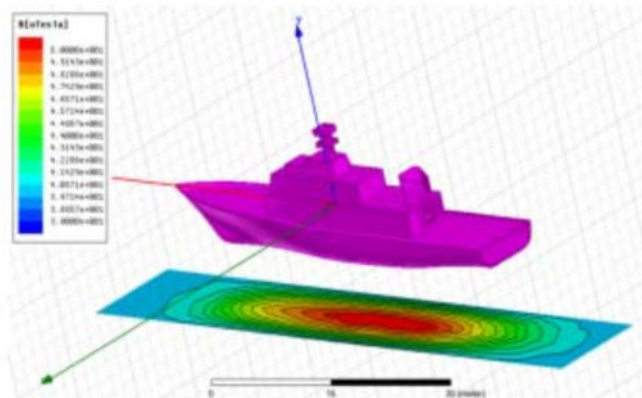


Figura 30: modelli di simulazione magnetica

Le basi di misura magnetica

Il primo passo da compiere per ridurre la firma magnetica di una nave o un sottomarino è identificare le aree dello scafo dove si hanno i contributi più marcati. Per fare questo serve eseguire una misura accurata del magnetismo che viene fatta in apposite basi di misura attraverso numerosi passaggi del natante che attraversano il poligono, seguendo differenti rotte. Il fattore chiave del poligono di misura, che si estende sul fondo del mare attraverso l'impiego di *array* lineari di magnetometri situati sul fondo, è che esso stesso non influenzi la misura, pertanto dovrà essere costituito da materiale non magnetico. Tipicamente, queste strutture di supporto sono costituite da tubi di calcestruzzo, fibra di vetro o cloruro di polivinile (PVC). L'attuale tendenza è, tuttavia, quella di rendere il rilevamento magnetico portatile attraverso l'impiego di *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV).

All'intero di tali veicoli dovranno essere montati piccoli sensori estremamente precisi ed affidabili che riescano non solo a valutare la magnitudo del campo magnetico, ma anche la direzione. Questi sensori dovranno essere sufficientemente robusti e tali da richiedere basse energie per il loro funzionamento. **Si sottolinea che i suddetti requisiti potranno essere pienamente soddisfatti quando la tecnologia quantistica dei sensori magnetici basati sulle vacanze di azoto all'interno del diamante sarà sufficientemente matura.**

Infine, trattandosi di sistemi *unmanned*, per poter effettuare una precisa campagna di rilevamento magnetico, l'area individuata per la misura dovrà essere libera da traffico marittimo, con condizioni meteo marine adeguate con ridotte correnti marine e stato del mare (inferiore a 2).

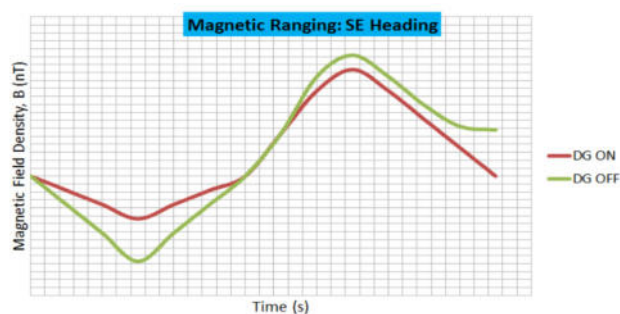


Figura 31: riduzione della segnatura magnetica con impiego di sistemi di degaussing

Sia che si tratti di un poligono fisso che di uno mobile, la misura della perturbazione magnetica prodotta dalla nave o dal sottomarino dovrà essere disponibile in tempo *near real time* al fine di valutare gli effetti indotti dai meccanismi interni di riduzione della segnatura magnetica (Figura 31), come ad esempio i sistemi di *degaussing* di bordo.

Gestione della Segnatura Magnetica

Si è in precedenza sottolineato come la firma magnetica di una unità navale può modificarsi nel tempo e diviene quindi necessario provvedere al monitoraggio continuo anche successivamente alla consegna dell'unità. Per ciò che attiene la riduzione della firma magnetica permanente questa viene effettuata attraverso il processo di *deperming* che dovrà essere ripetuto nel tempo in quanto, l'attraversamento continuo di zone della Terra, porta a fenomeni di isteresi e conseguenti variazioni della segnatura. Inoltre, per tutte quelle variazioni magnetiche che possono insorgere da sistemi/apparati che vengono imbarcati durante la vita operativa dell'unità (per le unità militari può essere, ad esempio, un nuovo sistema d'arma) è importante che l'unità militare abbia installato un sistema di *degaussing*¹⁵.

Deperming

Il processo di *deperming* viene generalmente svolto con unità ferma in porto attraverso l'impiego di cinture (o bobine) che vengono disposte in maniera tale da coprire i tre assi della magnetizzazione (verticale, longitudinale e trasversale). Naturalmente, dovrà essere possibile controllare con esattezza il livello di corrente da erogare in modo tale che sia abbastanza grande da poter cancellare la storia magnetica dello scafo.

Contestualmente all'applicazione di elevate correnti, viene effettuato un controllo del campo magnetico esterno attraverso una serie di sensori posizionati sul fondo del mare (generalmente ad una profondità compresa tra 9 e 15 metri) al fine di monitorare costantemente il campo magnetico residuo permanente. Ovviamente sarà fondamentale conoscere l'esatta posizione del nave/sottomarino rispetto ai sensori di misura affinché si possa ricostruire esattamente la magnitudo del campo magnetico, dato che questo decade secondo una legge proporzionale a $1/r^3$. I sensori, inoltre, dovranno essere sufficientemente fitti in modo tale da registrare la firma magnetica dell'unità con sufficiente precisione da poppa verso prora.



Figura 33: sistema di *deperming* di tipo *drive-in*

Si possono annoverare tre tipologie di strutture fisiche che possono essere impiegate per il *deperming* di un'unità militare. La prima raffigurata in (Figura 33) consiste in una struttura fissa attraversata da spire permanenti attraverso la quale viene fatta transitare l'unità da smagnetizzare (per questo motivo la struttura viene chiamata *drive-in magnetic silence*).

La seconda tipologia di *deperming facility* è chiamata *Static Over-run deperming process* (Figura 32) e consiste nell'installazione sul fondo marino di spire subacquee che possono generare

campi magnetici sufficientemente forti da smagnetizzare lo scafo dell'unità. In questo caso è importante che la quota del fondale non sia elevata in modo tale che la distanza tra le spire e lo scafo sia sufficientemente corta per generare campi magnetici incidenti di adeguata magnitudo.

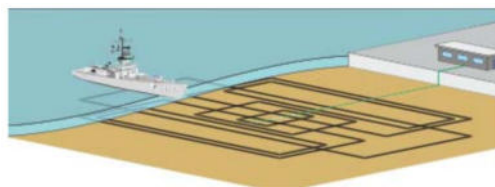


Figura 32: sistema di *deperming* di tipo *Static Over-run*

¹⁵ Il *degaussing* è il processo di riduzione della campo magnetico residuo.



Figura 34 sistema di deperming di tipo Close-Wrap

Infine, l'ultima opzione è il sistema chiamato *Close-Wrap* (Figura 34) che è sicuramente una soluzione flessibile e meno costosa delle precedenti in quanto prevede l'avvolgimento dello scafo con bobine amovibili che vengono singolarmente alimentate, agendo direttamente a contatto con lo scafo da smagnetizzare.

Degaussing System

Il processo di *degaussing* per un'unità navale può essere realizzato attraverso l'impiego di bobine che avvolgono lo scafo di bordo dall'interno, attraverso le quali, opportunamente percorse da corrente elettrica, è possibile di annullare localmente la magnetizzazione residua. Ovviamente, tale processo, che di massima segue quello del *deperming*, è volto a ridurre ancora di più il magnetismo residuo, ma non si pone, tuttavia, l'obiettivo di annullarlo completamente, quanto piuttosto di farlo scendere sotto un valore di soglia tale che la perturbazione prodotta dallo scafo durante la navigazione diventi impercettibile per i comuni sensori magnetici. Al fine di poter generare opportuni campi magnetici lungo ogni direzione, le bobine che avvolgono lo scafo sono disposte sia per chiglia che per madiera (Figura 35). Ciò non di meno, per quanto fitte siano le spire delle bobine, difficilmente riusciranno ad annullare completamente la firma magnetica. **Da qui l'importanza, dal punto di vista soprattutto della caccia ASW, di disporre di sensori magnetici che siano particolarmente performanti in termini di sensibilità.**

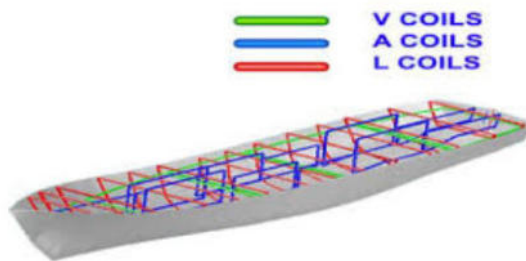


Figura 35: avvolgimenti dello scafo navale per il degaussing

I sistemi di *degaussing* più performanti sono quelli a cosiddetto circuito chiuso (*Closed Loop Degaussing - CLDG*), ovvero che impiegano sistemi di misura del campo magnetico esterno prodotto dalla piattaforma, calibrando le tensioni delle diverse spire per ridurre il più possibile il campo magnetico residuo lungo le tre direzioni.

Non diversamente da un sistema di smagnetizzazione convenzionale (non CLDG), il sistema CLDG utilizza bobine di smagnetizzazione attraversate da corrente elettrica. Tuttavia, a differenza della smagnetizzazione convenzionale (non CLDG), la smagnetizzazione CLDG prevede un sistema computerizzato di controllo del

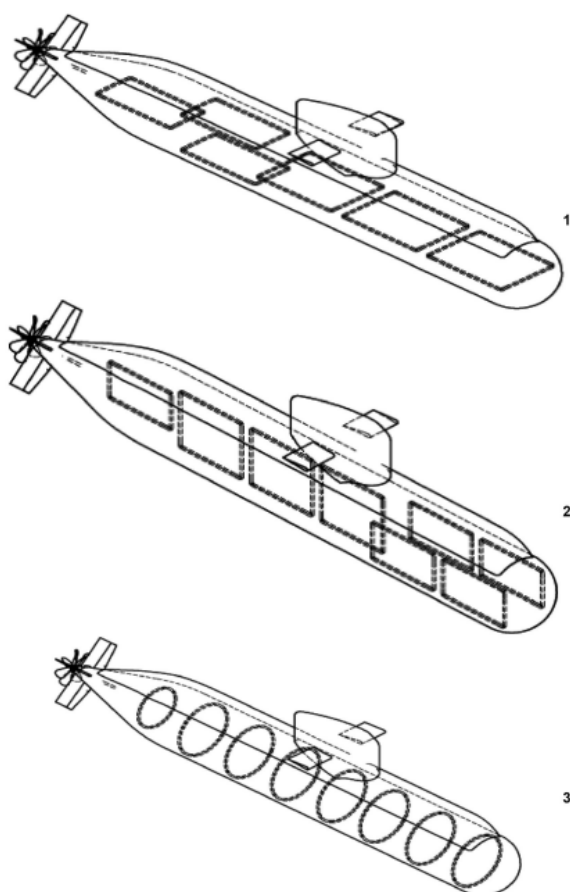


Figura 36: sistema di degaussing di tipo CLDG dei moderni sottomarini

feedback che, in tempo reale e su base continuativa, compensa i cambiamenti nella magnetizzazione della nave sulla base delle misurazioni magnetiche a bordo attraverso opportuni *probe*. Durante la navigazione, questi i sensori di bordo monitorano costantemente il campo magnetico esterno prodotto dalla nave o dal sottomarino in modo da rilevare le variazioni della firma magnetica dello scafo.

Con un siffatto sistema, lo scafo potrà monitorare costantemente i livelli di perturbazione prodotti durante la navigazione e, allo stesso tempo, ridurrà (o addirittura annullerà) la frequenza del processo di *degaussing* che si renderà necessario quando i livelli di magnetizzazione permanente dello scafo risulteranno non più compensabili dal sistema di *degaussing* di bordo.

Tuttavia, i moderni sottomarini¹⁶ vengono costruiti con materiale amagnetico che non necessita del trattamento di *deperming*, demandando tutta la compensazione del magnetismo residuo, dovuto principalmente ai fenomeni di induzione magnetica, al sistema di *degaussing* di bordo.

I sensori magnetici basati sulle NV del diamante: un possibile *game changer*

In sintesi quindi, per le navi ed i sottomarini è fondamentale conoscere e monitorare la propria firma magnetica in quanto tale potrebbe essere il fattore abilitante impiegato dall'opponente per il riconoscimento e la neutralizzazione della stessa Unità militare. Il controllo della perturbazione magnetica prodotta dovrà periodicamente esser svolto alla luce dei molteplici fattori che incidono e possono modificare la segnatura magnetica come la latitudine dell'area di navigazione, la tipologia di sistemi installati a bordo. In aggiunta, se la piattaforma è un sottomarino andrà valutato anche l'effetto dello stress meccanico a cui viene sottoposto lo scafo in funzione delle strizioni ripetute del metallo che modificheranno l'isteresi magnetica. Benché esistano metodi per ridurre il magnetismo permanente (*deperming*) e quello residuo (*degaussing*), oggi le moderne unità navali che maggiormente temono la minaccia delle mine magnetiche sono costruite con materiali amagnetici, come la vetroresina nelle unità cacciamine o i metalli amagnetici nei moderni (e più costosi) sottomarini. Tuttavia, ciò non è ritenuto sufficiente e, pertanto, in fase di progettazione le suddette piattaforme vengono pensate e realizzate per accogliere, allo stesso tempo, sistemi di *degaussing*. Lo scopo di tali sistemi sarà abbattere il più possibile il magnetismo indotto che comunque sarà presente durante la navigazione o in presenza di determinati impianti imbarcati che, nonostante tutte le accortezze adottate, potrebbero essere la fonte di campi magnetici non voluti. Va comunque sottolineato che anche i sistemi di

¹⁶ Ad esempio i sottomarini Italiani della classe Todaro sono realizzati in materiale amagnetico ed ogni sistema/impianto di bordo, prima di essere imbarcato subisce un processo di smagnetizzazione atto a ridurre il campo magnetico prodotto sotto un determinato valore di soglia.

degaussing avranno delle limitazioni che non permetteranno di abbattere completamente il magnetismo al di sotto di pochi nano Tesla.

Oggi, questi valori di magnetismo risultano sufficienti al fine di contenere le anomalie magnetiche sotto la soglia dei valori percepibili dai tradizionali sensori di misura del campo magnetico. Ciò nonostante, le tecnologie quantistiche promettono di realizzare sensori che riescono a monitorare i campi magnetici con sensibilità fino all'ordine dei femto Tesla. Il grosso limite dei sensori quantistici era, fino non più di qualche anno fa, la scarsa praticità di impiego che ne prevedeva il corretto funzionamento a temperature prossime allo zero Kelvin. **I sensori basati sulle vacanze di azoto all'interno dei nano cristalli di diamante superano questi limiti, potendo funzionare a temperatura ambiente e ponendosi di diritto a potenziale tecnologia disruptive per applicazioni militari nella lotta *Anti Submarine Warfare*. Un approfondimento specifico dei possibili campi di applicazione di tali sensori che ne determina l'alta valenza operativa per la Marina Militare è trattato nel capitolo successivo.**

Capitolo 4 – Valenza operativa dei Magnetometri Quantistici

Futuri campi di applicazione

Se da un lato, nel capitolo precedente, è chiaro lo sforzo sostenuto dalle Marine per ridurre il più possibile la segnatura magnetica delle Unità Navali, sia con l'impiego di processi di *deperming* e *degaussing* sia con l'impiego di materiali amagnetici, gli studi sui sensori MAD non può fermarsi alle tecnologie tradizionali. Ecco quindi affacciarsi la possibilità di impiego dei sensori magnetici basati sulla *Quantum Technology* che promettono altissime *performance* non solo in termini di sensibilità di misura, ma anche in termini di risoluzione spaziale con capacità, almeno in linea teorica, di ricostruire anche l'*imaging* dell'oggetto ricercato. Fino a pochi anni fa, l'impiego di tali sensori risultava fortemente limitato dalle problematiche connesse al raggiungimento delle temperature criogeniche di funzionamento dei dispositivi quantistici. Con la scoperta dei sensori basati sulle NV del diamante che lavorano a temperatura ambiente, il vantaggio che attualmente hanno i moderni sottomarini amagnetici potrebbe nel prossimo futuro ridursi o addirittura annullarsi. Questa tecnologia, particolarmente promettente, dovrà tuttavia essere esplorata nel dettaglio soprattutto in relazione alle possibili applicazioni pratiche, prevalentemente militari, ma anche di tipo civile. Di seguito, dunque, verranno presentati alcuni campi di impiego (con possibili risvolti di tipo *dual use*), che potranno nel prossimo futuro essere studiati attraverso progetti di ricerca dedicati e specialistici (incentrati sui *gap* tecnologici che verranno sottolineati) come ad esempio i Piani Nazionali di Ricerca Militare¹⁷ (PNRM) promossi dalla Ministero della Difesa Italiana.

Caccia ASW ed operazioni MCM con UUV

I moderni scenari operativi della lotta ASW vedono un estensivo impiego di *Underwater Unmanned Vehicles* (sia AUV che ROV) come strumento di ampliamento delle capacità di rilevamento degli assetti impiegati nella scoperta di sottomarini. L'attuale tecnologia di comunicazione subacquea, combinata all'impiego di canali comunicativi satellitari, permette la costituzione di reti di veicoli *unmanned* subacquei che comunicano tra loro e scambiano dati con un centro a terra, costituendo un vera e propria rete mobile informativa subacquea.

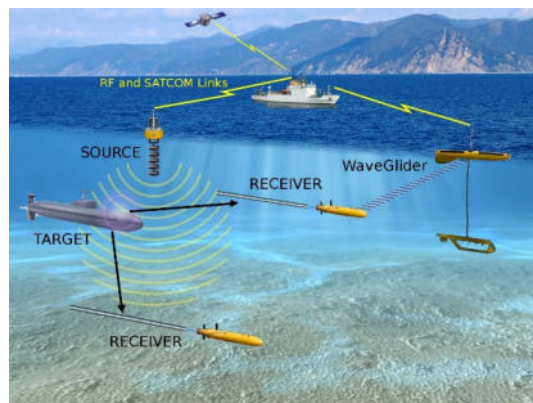


Figura 37: impiego di unmanned nella lotta ASW

¹⁷ I PNRM sono lo strumento principale della Difesa per perseguire l'innovazione tecnologica. Tali programmi hanno come obiettivo la crescita e la maturazione delle tecnologie per applicazioni militari sia in ambito nazionale che in chiave di cooperazione internazionale.

L'enorme sforzo di integrazione di tutti questi veicoli risulterà vanificato se gli UUV¹⁸ non saranno dotati di adeguati sensori per il rilevamento ed il riconoscimento di bersagli subacquei. In tale ottica rientrano appieno i sensori di scoperta magnetici, che, insieme a quelli acustici, costituiscono la principale "sensoristica" di scoperta subacquea installabile sui veicoli *unmanned*.



Figura 38: ROV in operazioni MCM

Dotare quindi i veicoli *unmanned* subacquei di sensori magnetici adeguatamente sensibili che permettano di rivelare i moderni sottomarini, diviene sicuro un campo di applicazione da dover approfondire e studiare nei prossimi anni anche alla luce delle notevoli *performances* dei moderni sottomarini nel campo della riduzione della segnatura magnetica. In tale ambito i sensori basati sulle NV del diamante possono risultare un fattore chiave nei futuri scenari operativi della lotta ASW.

Nondimeno, dotare i veicoli *unmanned* di sensori magnetici di ultima generazione potrebbe portare indubbi vantaggi anche nelle operazioni di *Mine Counter Measures* (MCM). Infatti, l'impiego di questi sensori magnetici abbinati ai veicoli *unmanned*, ridurrebbe significativamente i pericoli a cui è sottoposto il personale militare durante tale tipologia di operazione.

Infine, il connubio sensori magnetici e UUV avrebbe un risvolto anche di tipo *dual use* sia nel monitoraggio dell'inquinamento del fondale marino dovuti a oggetti ferrosi sia nello sfruttamento delle risorse minerarie in mare. Ciò nonostante, tutti questi ambiti di applicazione, dovranno essere studiati attentamente attraverso dei progetti di studio dedicati che risolvano tutti i possibili problemi derivanti dall'integrazione dei sensori basati sulle NV del diamante all'interno dei veicoli subacquei.

Caccia ASW con UAV

Tra i concetti operativi della NATO [11], facenti pienamente parte anche della dottrina militare Statunitense, vi è sicuramente l'impiego degli *Unmanned Air Vehicle* (UAV) per la caccia ASW. Tuttavia, un sottomarino che naviga a quota profonda difficilmente potrà essere rivelato da un UAV. Quest'ultimo infatti potrebbe impiegare sensori di tipo Elettro/Ottico per l'individuazione della segnatura ottica o infrarossa del sottomarino. Per ciò che attiene la segnatura ottica, questa sarà difficilmente rilevabile a meno che il sottomarino non abbia da poco tempo abbandonato la quota periscopica e sia ancora visibile la scia. Il medesimo concetto varrà anche per la segnatura infrarossa. Infatti se il sottomarino avrà già da tempo abbandonato la quota periscopica difficilmente sarà possibile riscontrare un gradiente termico della superficie del mare associabile alla presenza del sottomarino.

Nel suddetto scenario, l'unica *chance* di rivelare il sottomarino si avrà attraverso il monitoraggio delle anomalie magnetiche con l'impiego di sensori MAD.

Ciò nonostante, bisogna tenere presente che i moderni sottomarini costruiti con materiali amagnetici, hanno valori di magnetismo residuo dell'ordine di pochi nano Tesla, divenendo praticamente impercettibili da qualsiasi sensore magnetico tradizionale che effettua delle misure a distanze superiori ai cento metri dal sottomarino.

Considerando, ad esempio, un sottomarino che naviga ad appena 80 metri di quota dalla superficie del mare e un UAV che effettua una sortita di ricerca a 20 metri di altitudine, il MAD installato a bordo dell'UAV



Figura 39: UAV di piccole dimensioni

¹⁸ Con gli UUV (*Underwater Unmanned Vehicle*) si intendono sia gli AUV che i ROV

dovrebbe avere una sensibilità dell'ordine dei femto Tesla¹⁹ per poter discriminare un'anomalia magnetica rispetto al campo magnetico Terrestre, oggi raggiungibile solo con sensori magnetici che impiegano una tecnologia quantistica. Tuttavia, dovendo essere installati a bordo di un UAV, la scelta del rivelatore magnetico non può che ricadere su dispositivi che, per funzionare, non debbano raggiungere temperature criogeniche come, ad esempio, i sensori basati sulle NV del diamante. **Un possibile ambito di ricerca che sarà necessario investigare è proprio legato all'integrazione di questi sensori quantici su veicoli aerei *unmanned* che si immagina siano adatti al volo radente alla superficie del mare al fine di minimizzare l'attenuazione dell'ampiezza del campo magnetico legato alla distanza. Inoltre, anche tale applicazione sui UAV potrà essere presa in considerazione per impieghi di tipo *dual use* legati al monitoraggio dell'inquinamento ed alla ricerca mineraria in mare.**

Sistemi di sorveglianza subacquea

Fin dai tempi della Guerra Fredda sono sempre stati installati degli *array* di sensori subacquei, sia per la rivelazione di anomalie magnetiche sia di segnali acustici, con l'obiettivo di scovare sottomarini. Di recente questa tecnologia è stata rivisitata dalle potenze emergenti come l'India per la tutela dei propri interessi nazionali sia in termini di sicurezza nazionale sia in termini di tutela delle attività economiche nei confronti della Cina. L'obiettivo che si pongono questi lunghi *array* è la rivelazione di sottomarini che accedano alle acque comprese nella Zona Economica Esclusiva (ZEE). Per far ciò l'India ha, infatti, di recente, steso 2300 Km di cavi subacquei in fibra ottica connessi a sensori acustici e magnetici che monitorano costantemente il dominio subacqueo, trasmettendo informazioni alle centrali a terra con velocità di 100 Gb/s.

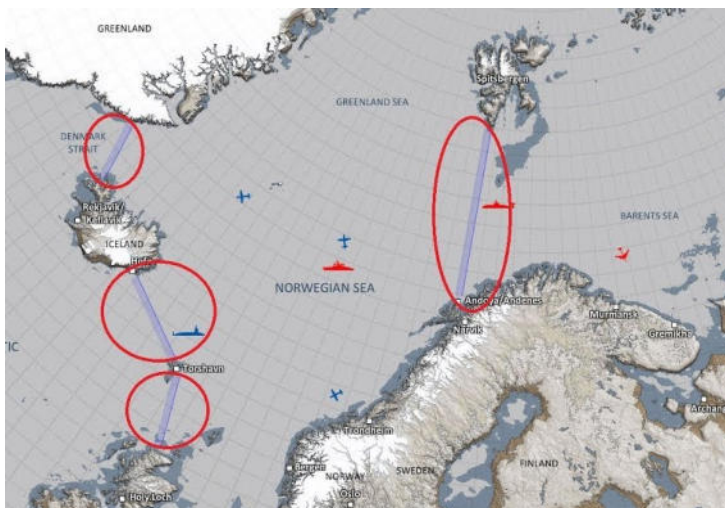


Figura 40: disposizione degli array SOSUS

Come sottolineato in precedenza, l'idea di stendere array di sensori subacquei risale alla Guerra Fredda quando gli Americani stesero il sistema SOSUS²⁰ per monitorare l'accesso all'oceano Atlantico



Figura 41: lofargramma del SOSUS

dei sottomarini Russi. Tuttavia all'epoca i sensori presenti all'interno dell'array erano esclusivamente acustici e basavano le proprie capacità di scoperta, ad enormi distanze, sull'impiego di basse frequenze di lavoro²¹. Ciò non dimeno, oggi, le moderne tecniche costruttive dei sottomarini li rendono particolarmente silenziosi, quindi andranno valutati sistemi combinati tra sensori acustici e sensori magnetici (particolarmente sensibili e performanti) per aumentare le *chance* di scoperta e rilevamento dei moderni sottomarini.

¹⁹ L'ampiezza del campo magnetico decresce in funzione della distanza di un fattore $\frac{1}{r^3}$, la perturbazione magnetica prodotta da un semovente marino a distanza di 100 metri dal rivelatore risulta attenuata di 60 dB. Dunque un sottomarino con un campo magnetico residuo dell'ordine dei 100nT, al ricevitore apparirà ridotto di milionesimo ovvero dell'ordine dei 100 fT.

²⁰ SOund SURveillance System

²¹ Alle basse frequenze le perdite di assorbimento acustico sono minime.

Per quanto sopra, un ulteriore possibile ambito di ricerca che potrebbe essere utile investigare è l'impiego combinato di sensori acustici e sensori magnetici in *array* subacquei per la sorveglianza delle acque territoriali o *choke point* di particolare interesse economico e commerciale.

Mine ad attivazione magnetica

L'impiego delle prime mine ad attivazione magnetica risale alla prima guerra mondiale quando gli inglesi usarono per la prima volta questa tipologia di mine. Dopo più di cento anni le mine costituiscono ancora un importante minaccia alle attività navali e subacquee avversarie anche in relazione al costo relativamente



Figura 42: esplosione di mina subacquea

basso del loro impiego, alla facilità di rilascio ed al grave danno che possono infliggere. Di contro, per bonificare un'area marina sottoposta a "minamento" servono enormi sforzi in termini di impiego di risorse e mezzi da impiegare.

La mina ha quindi un'enorme fattore psicologico sull'avversario poiché, a fronte di una vasta flessibilità di impiego, di tipo offensivo²², difensivo²³ e protettivo²⁴, ed in considerazione della facilità di utilizzo, il suo impiego risulta altamente pagante.

Pertanto, le unità navali come i sottomarini e i mezzi cacciamine (maggiormente soggette ad operare in aree sottoposte a minamento) hanno sempre di più puntato

l'attenzione sul ridurre il più possibile la propria segnatura magnetica, di fatto rendendo particolarmente improbabile l'innescò della mina attraverso l'attivazione magnetica. Nello specifico le mine ad attivazione magnetica impiegano magnetometri tradizionali di tipo *fluxgate* tri-assiali. Il principio di funzionamento del *fluxgate* si basa sulla variazione nel tempo della permeabilità del nucleo che è periodicamente portato in saturazione in entrambe le polarità attraverso un campo magnetico alternato prodotto da una corrente che scorre attraverso una bobina di eccitazione. Quando un materiale magnetico è saturato, la sua permeabilità di magnetizzazione decresce, il che equivale a far traslare verso sinistra il ciclo di isteresi del materiale del nucleo ferromagnetico. L'asimmetria prodotta genera delle armoniche che sono proporzionali al campo magnetico esterno che, misurate, danno un'indicazione della presenza di una perturbazione magnetica. Per la sua semplicità il magnetometro *fluxgate* continua ad essere utilizzato all'interno delle mine ad attivazione magnetica, tuttavia le sensibilità di ricezione sono dell'ordine del nT.

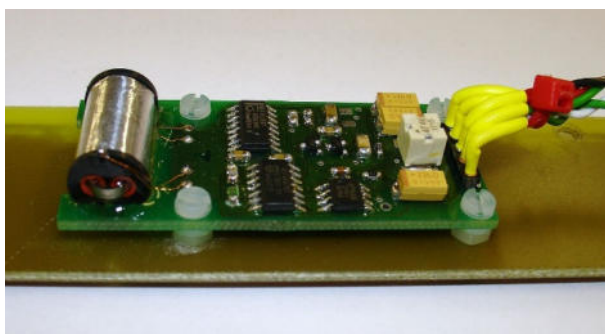


Figura 43: magnetometro tipo *fluxgate*

Come già più volte rappresentato, i moderni sottomarini e cacciamine riescono a contenere la propria segnatura magnetica, rendendo particolarmente difficoltosa la loro rivelazione da parte di questi sensori. **Un ulteriore possibile ambito di ricerca che sarà quindi possibile investigare sarà legato all'integrazione dei sensori magnetici quantistici basati sulle NV del diamante all'interno delle mine. Servirà tuttavia dover studiare l'integrazione e l'efficacia del sensorie nei variegati scenari operativi che possono presentarsi.**

²² In acque sotto il controllo nemico

²³ In acque internazionali o stretti sotto il controllo dell'alleanza

²⁴ In acque territoriali costiere

Utilità dell'elaborato per la Forza Armata

L'elaborato, presenta un'innovativa tecnologia basata sulle *Nitrogen Vacancies* all'interno dei nano cristalli di diamante con la quale è possibile realizzare dei sensori magnetici quantistici con elevate sensibilità di misura dei campi magnetici e notevole capacità di risoluzione spaziale. Tuttavia, ad oggi la tecnologia risulta discretamente matura per applicazioni nel campo della biomedicina in cui il sensore è nelle immediate vicinanze del oggetto/tessuto biologico da monitorare, ma alquanto "acerba" per applicazioni nel campo militare.

Ciò nonostante, la possibilità di impiego di questa tipologia di sensori a temperatura ambiente, differentemente a quanto accade per ulteriori sensori quantistici magnetici come dispositivi SQUID che, per funzionare, hanno bisogno di temperature prossime allo zero Kelvin, rende i sensori basati sulle NV all'interno del diamante particolarmente interessanti.

In questo documento, si è presentato quindi il principio di funzionamento dei sensori magnetici quantici basati sulle NV del diamante, dando delle indicazioni sulla sensibilità di misura e illustrando uno schema di massima di realizzazione del sensore. La compattezza e semplicità di impiego risulta un fattore chiave per un possibile impiego in numerose applicazioni militari della caccia ASW fatta dai sistemi *unmanned* (sia aerei che subacquei), ai sistemi di sorveglianza strategica subacquea, alle operazioni di *Mine Counter Measures* e *Mine Release*. L'impiego di tali sensori magnetici potrebbe non solo avere interesse di carattere militare, ma anche per applicazioni in ambito civile attinenti all'inquinamento e al monitoraggio delle risorse minerarie nel sottosuolo marino.

Ciò nondimeno, sia per applicazioni nel campo militare che civile, dovranno essere superati dei *gap* tecnologici specifici legati all'integrazione del sensore magnetico quantistico all'interno della piattaforma (sia questo un vettore *unmanned*, un sistema di sorveglianza fisso od una mina). Un possibile strumento che la Difesa ha attualmente per perseguire l'innovazione tecnologica è il Piano Nazionale di Ricerca Militare a cui si può fare affidamento nei prossimi anni per tentare di colmare i *gap* tecnologici che sono stati evidenziati in questo studio. Il documento quindi si prefigge anche l'obiettivo di stimolare l'I.P., gli Enti di Ricerca e il mondo accademico in questo settore che ha oggi evidenti potenzialità, ma altrettanti vincoli tecnico-progettuali e di integrazione da risolvere.

In definitiva, l'impiego dei sensori magnetici quantistici basati sulle NV del diamante potrebbero nel prossimo futuro rivelarsi un vero e proprio *game changer* nella lotta ASW andando a ridurre, perfino ad annullare, quel guadagno che hanno oggi i moderni sottomarini con le loro bassissime, quasi impercettibili, signature magnetiche.

Bibliografia

- [1]. Johannes Herrmann, Marc A. Appleton, Kento Sasaki, Yasuaki Monnai, Tokuyuki Teraji, Kohei M. Itoh and Eisuke Abe, 03.11.2016, Articolo **“Polarization- and frequency-tunable microwave circuit for selective excitation of nitrogen-vacancy spins in diamond”**
- [2]. Ngoc Diep Lai, Dingwei Zheng, Fedor Jelezko, Francois Treussart, and Jean-Francois Roch, 08.09.2009, Articolo **“Influence of a static magnetic field on the photoluminescence of an ensemble of Nitrogen-Vacancy color centers in a diamond single-crystal”**
- [3]. Keunhong Jeong, Anna J. Parker, Ralph H. Page, Alexander Pines, Christophoros C. Vassiliou, Jonathan P. King, Articolo **“Understanding the magnetic resonance spectrum of nitrogen vacancy centers in an ensemble of randomly-oriented nanodiamonds”**
- [4]. J. M. Taylor¹, P. Cappellaro, L. Childress, L. Jiang, D. Budker, P. R. Hemmer, A. Yacoby, R. Walsworth, M. D. Lukin, 09/05/2008, Articolo **“High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution”**
- [5]. James L. Webb, Luca Troise, Nikolaj W. Hansen, Jocelyn Achard, Ovidiu Brinza, Robert Staacke, Michael Kieschnick, Jan Meijer, Jean-Francois Perrier, Kirstine Berg Sørensen, Alexander Huck and Ulrik Lund Andersen, 26.08.2020, Articolo **“Optimisation of a diamond nitrogen vacancy centre magnetometer for sensing of biological signal”**
- [6]. Akihiro Kuwahata, Takahiro Kitaizumi, Kota Saichi, Takumi Sato, Ryuji Igarashi, Takeshi Ohshima, Yuta Masuyama, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano, Fedor Jelezko, Moriaki Kusakabe, Takashi Yatsui & Masaki Sekino, Articolo Scientifico 2020, **“Magnetometer with nitrogen vacancy center in a bulk diamond for detecting magnetic nanoparticles in biomedical applications”**, www.nature.com/scientificreports
- [7]. Feng-Jian Jiang, Jian-Feng Ye, Zheng Jiao, Zhi-Yong Huang e Hai-Jiang Lv, Articolo 26.04.2018, **“Estimation of vector static magnetic field by a nitrogen-vacancy center with a single first-shell ¹³C nuclear (NV-¹³C) spin in diamond”**
- [8]. A. Batalov, C. Zierl, T. Gaebel, P. Neumann, I.-Y. Chan, G. Balasubramanian, P. R. Hemmer, F. Jelezko, and J. Wrachtrup, Articolo 22.02.2008, **“Temporal Coherence of Photons Emitted by Single Nitrogen-Vacancy Defect Centers in Diamond Using Optical Rabi-Oscillations”**
- [9]. Timo Weggler, Christian Ganslmayer, Florian Frank, Tobias Eilert, Fedor Jelezko, and Jens Michaelis, 2020, Articolo rivista NanoLetters, pubs.acs.org/NanoLett, **“Determination of the Three-Dimensional Magnetic Field Vector Orientation with Nitrogen Vacancy Centers in Diamond”**
- [10]. Mahdi Che Isa, Hasril Nain, Nik Hassanudin Nik Yusoff, Abdul Rauf Abdul Manap, Roslan Slamatt & Mohd Hambali Anuar, Ricerca, Dicembre 2019, **“An overview of ship magnetic signature and silencing technologies”**
- [11]. Kathleen H. Hicks, Andrew Metrick, Lisa Sawyer Samp, Kathleen Weinberger, Report Luglio 2016, **“Undersea Warfare in Northern Europe”**
- [12]. D.S. Terracciano, L. Bazzarello, A. Caiti, R. Costanzi, V. Manzari, Articolo 27 agosto 2020, **Marine Robots for Underwater Surveillance**

Allegato 1 – Effetto Hall

Cos'è l'effetto Hall

L'**effetto Hall** è un fenomeno fisico per il quale si osserva una differenza di potenziale in senso trasversale in un conduttore attraversato da corrente elettrica in verso longitudinale quando questo è sottoposto ad un campo magnetico perpendicolare. Prende il nome dal fisico statunitense Edwin Hall.

L'elemento di Hall è formato da una striscia di materiale che può condurre elettricità, di solito un metallo conduttore o un semiconduttore. Lo spessore della striscia è trascurabile rispetto alle altre due dimensioni. In questo materiale viene fatta scorrere una corrente applicando una batteria ai suoi capi. Nei conduttori gli elettroni si muovono dal polo negativo a quello positivo della batteria. Il magnete crea un campo magnetico che va dal polo Nord al polo Sud dello stesso magnete. L'elemento di Hall è immerso in tale campo magnetico. Poiché gli elettroni di conduzione si muovono e risentono del campo magnetico su di loro agisce la forza di Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

dove q è la carica dell'elettrone²⁵, $\vec{v}$ è la velocità di deriva dell'elettrone, $\vec{B}$ è il campo magnetico.

Usando il prodotto vettoriale e usando la regola della mano destra, il pollice indica la direzione della velocità, dal polo negativo della batteria a quello positivo, l'indice indica la direzione del campo magnetico, cioè dal polo Nord al polo Sud del magnete, e con il medio si indica la direzione della forza. È necessario tenere presente che la carica dell'elettrone è negativa ($q = -1.6022 \times 10^{-19}$ C) e quindi il prodotto cambia di segno. Nella Figura 44, per esempio, la regola della mano destra indicherebbe una forza diretta verso il basso, ma, considerando il segno negativo, la forza risultante è diretta verso l'alto. Per praticità, si può applicare la regola della mano destra considerando una velocità di verso opposto a quella reale, includendo così già il segno negativo nella direzione della velocità e ottenendo la direzione della forza direttamente. Per i calcoli, quindi, è sufficiente usare il modulo della carica dell'elettrone. Per come sono disposti la batteria e il magnete nella Figura 44, dunque, gli elettroni subiscono una forza diretta verso l'alto. Questo si può verificare misurando la tensione fra le zone in alto e in basso dell'elemento di Hall. Come indicato nella figura con zone blu e rossa, gli elettroni forzati ad andare verso l'alto creano un addensamento di cariche negative e, per la neutralità totale dell'elemento di Hall, in basso si forma un gruppo di cariche positive. La differenza di potenziale misurata fra la parte alta e quella bassa si chiama *potenziale di Hall*. Nei riquadri B, C e D in Figura 44 si vede l'andamento della forza a cui sono soggetti gli elettroni al variare delle direzioni di tensione della batteria e del campo magnetico.

Man mano che gli elettroni si muovono, gli accumuli di carica aumentano. Dopo un tempo abbastanza lungo, si arriverà ad una condizione di equilibrio dinamico delle forze fra il campo elettrico longitudinale (quello dato dalla tensione di Hall) e la forza di Lorentz, ovvero:

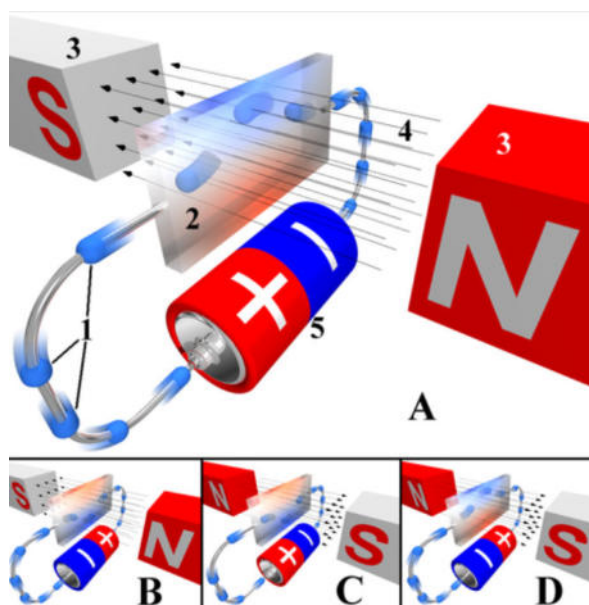


Figura 44: schematizzazione dell'effetto Hall

²⁵ $-1,6022 \times 10^{-19}$ Coulomb

$$qE = qv_d B \Rightarrow \vec{F}_s = q\vec{v}_d \times \vec{B} \quad (3)$$

dove rappresenta il modulo del campo elettrico tra i due estremi (superiore ed inferiore) del conduttore. Essendo la tensione di Hall:

$$\Delta V_H = E d_2 = v_d B d_2 = \frac{1}{nq} \frac{iB}{d_1} \quad (4)$$

Si trova quindi la velocità delle cariche elettriche. Talvolta il rapporto

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (5)$$

viene detto *costante di Hall*. Conoscendo le dimensioni fisiche del conduttore e l'intensità di corrente elettrica, possiamo determinare anche il numero di cariche elettriche che attraversano una sezione dell'elemento di Hall. Infatti:

$$n = \frac{i}{qv_d A} \quad (6)$$

dove n è il numero di cariche per unità di volume, A è l'area dell'effetto di Hall, i è l'intensità di corrente.

Utilizzi

Fra la corrente che circola nell'elemento di Hall e la tensione di Hall misurata esiste un certo legame: questo permette di creare dei resistori di precisione. L'effetto Hall è anche usato nelle sonde di corrente, come le pinze amperometriche: questi strumenti particolari possono misurare l'intensità di corrente elettrica che scorre in un filo senza la necessità di porre lo strumento di misura in serie, ovvero senza spegnere e interrompere il circuito. Le sonde Hall, invece, sono usate per misurare l'intensità del campo magnetico. Un altro semplice impiego è costituito dai pulsanti elettrici ad azionamento manuale, a volte impiegati in apparecchiature elettroniche; pigiando il pulsante viene spostato un piccolo magnete in corrispondenza del sensore Hall, il quale genera un impulso logico privo di rimbalzi.



Figura 45: esempio di sonda di Hall

Allegato 2 – Giunzione Josephson

Principio di funzionamento ed applicazione negli SQUID

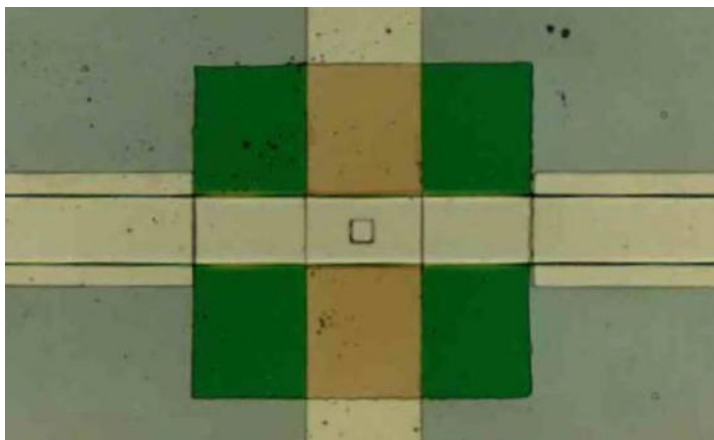


Figura 46: giunzione di Josephson

La giunzione Josephson è composta da due strisce di superconduttori separate da un isolante. La fisica alla base della giunzione Josephson si basa sull'effetto tunnel, un effetto caratteristico della meccanica quantistica. In Figura 46 vengono mostrati due elettrodi metallici di niobio isolati da un isolante spesso tranne che in una regione dell'ordine del μm^2 , in cui sono separati da una sottile barriera di pochi nm di ossido di alluminio. Se temperatura è sufficientemente alta, superiore a quella critica degli elettrodi ($T_c = 9,2 \text{ K}$ nel caso del niobio), la barriera tunnel si comporta come una resistenza R_n ,

che segue la legge di Ohm. Il valore della resistenza dipende esponenzialmente dallo spessore della barriera, a causa dell'effetto tunnel.

Al di sotto della temperatura critica T_c , il niobio diventa superconduttore in quanto le oscillazioni del reticolo cristallino diminuiscono di intensità ed il passaggio di un elettrone attrae i protoni generando una deformazione del reticolo. L'elettrone che si trova nelle "vicinanze" viene attratto da tale deformazione e si forma una coppia elettrone-elettrone (chiamata Coppia di Cooper). Le coppie di Cooper si muoveranno nelle 2 strisce della giunzione, mentre il materiale isolante costituirà una barriera che si oppone al passaggio di particelle (barriera di potenziale).

Qui interverrà la meccanica quantistica con le sue leggi che prevedranno che le particelle elementari abbiano una certa probabilità di attraversare la barriera di potenziale. Più o meno allo stesso modo allo stesso modo di un'onda elettromagnetica che incide su di un conduttore. Nella zona dove lo spessore dell'isolante sarà ridotto a pochi nm con ossido di alluminio, le coppie di Cooper saranno soggette all'effetto tunnel attraverso la giunzione. Sarà quindi presente un flusso di corrente elettrica trasportata dalle coppie di Cooper attraverso la giunzione, anche in assenza di tensione applicata.

Le proprietà delle giunzioni di Josephson sono applicate negli SQUID composti da un anello superconduttore all'interno del quale sono apposte due giunzioni Josephson (Figura 47).

In assenza di campo magnetico esterno, nell'anello fluisce una corrente dovuta al *tunneling* delle coppie di Cooper. Quando viene applicato un campo esterno, comincia invece a fluire nell'anello una corrente di *screening* che genera un campo magnetico che si somma a quello esterno. A seconda del campo magnetico applicato questa corrente assume valori oscillanti. Quando la corrente supera la corrente critica dello SQUID, viene rilevata una d.d.p. ai capi dell'anello la cui intensità è legata all'intensità del campo magnetico esterno.

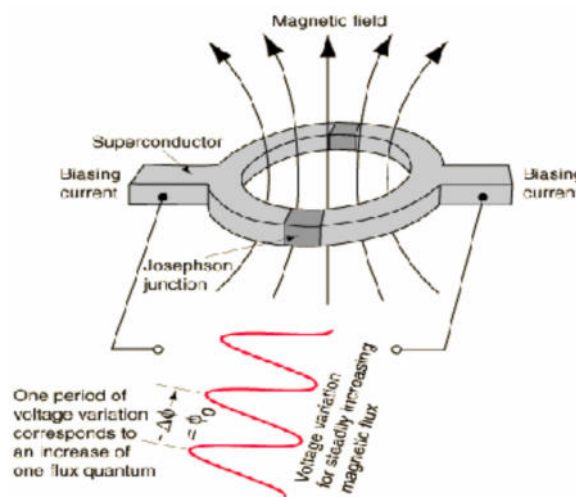


Figura 47: SQUID composto da un anello superconduttore e giunzioni di Josephson

Allegato 3 – Spin Elettronico

Che cosa è lo Spin

Lo spin è una proprietà intrinseca delle particelle e può essere interpretato come un momento angolare, in altre parole una rotazione. Tuttavia non è possibile dare una descrizione corretta facendo ricorso a immagini classiche.

Lo spin di una particella fu ipotizzato per la prima volta da Wolfgang Pauli come un concetto puramente matematico nell'ambito della fisica quantistica, agli albori del XX secolo e non fu pensato come un qualcosa di reale, cioè qualcosa che si potesse realmente misurare. Il concetto espresso da Pauli, che poi prese il nome di "Principio di esclusione di Pauli", chiariva che: per un sistema di particelle (come due elettroni in un atomo) era vietato stare nello stesso stato energetico, in pratica era vietato alle particelle avere le stesse caratteristiche fisiche. Solo in questo modo la struttura degli atomi poteva essere pienamente descritta dalla teoria. Il principio di Pauli si applica solo a particelle che hanno spin semi-intero ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) proprio come l'elettrone che ha spin $1/2$. Infatti, secondo il Modello Standard della materia, tutte le particelle elementari che formano la materia visibile hanno spin $1/2$ e vengono genericamente chiamate fermioni, seguendo la classificazione statistica effettuata da Enrico Fermi. Matematicamente significa che la loro funzione d'onda, l'equazione che descrive lo stato corrente della particella, è antisimmetrico per trasformazioni, per esempio per rotazioni. Tale anti-simmetria porta alla descrizione usata da Hawking che afferma che: "per una rotazione completa (360°) la funzione d'onda dà un segno negativo (è antisimmetrica!). Per tornare alla situazione iniziale, un'altra rotazione completa (in totale 720°) è necessaria per riavere esattamente la stessa funzione d'onda che la particella possedeva prima della rotazione.

Esiste un'altra classe di particelle che ha lo spin intero ($0, 1, 2, \dots$). Tali particelle sono i mediatori delle forze fondamentali esistenti tra le particelle che formano la materia (quelle con spin semi-intero). Tali mediatori sono chiamati bosoni, secondo la descrizione statistica formulata dal fisico indiano S.N.Bose. Essi si comportano in modo completamente diverso dai fermioni, in particolare non obbediscono al *Principio di Esclusione di Pauli* e, di conseguenza, possono trovarsi nello stato energetico che desiderano, anche se occupato da altri bosoni. I bosoni hanno una funzione d'onda simmetrica, di conseguenza, a seguito di una trasformazione completa (p.es. una rotazione di 360°) tornano nello stato iniziale.

La scoperta dello spin

Lo spin degli elettroni ($s=1/2$) è stato misurato nel famoso esperimento di Stern-Gerlach, ma la vera scoperta dello spin è stata fatta da due giovani fisici: G.E.Uhlenbeck e S.A.Goudsmit. È curioso ricordare che, inizialmente, Pauli non era convinto che quello che i giovani fisici chiamavano spin era la stessa quantità che lui aveva postulato. Se un elettrone ha un momento magnetico intrinseco (spin), allora anche un atomo neutro, con un certo numero di elettroni nei suoi orbitali, può essere sensibile a un campo magnetico esterno. Nel 1921, Otto Stern e Walther Gerlach pensarono di effettuare tale misura: presero un fascio di atomi di argento elettricamente neutri e lo fecero passare attraverso un campo magnetico non uniforme. Tale campo defletteva gli atomi di argento allo stesso modo di un piccolo magnete dipolo. Il risultato dell'esperimento fu assolutamente inaspettato. Secondo la fisica classica, gli atomi avrebbero dovuto essere deflessi in modo uniforme (una grande macchia circolare sulla lastra fotografica dove terminavano il loro percorso) dato che lo spin degli elettroni negli atomi di argento poteva essere orientato in qualsiasi direzione. Il risultato dell'esperimento mostrava invece solo un contorno circolare e nulla al centro.

L'unica possibile spiegazione per tale comportamento era che i momenti magnetici (gli spin) potevano avere solo due possibili orientazioni nello spazio. Questo è quello che in fisica si chiama "quantizzazione", e infatti in fisica quantistica solo determinati valori dello spin sono possibili. Fu dimostrato quindi che lo spin dell'elettrone è correlato al momento magnetico poiché può essere usato per **misurare la direzione dello**

spin dell'elettrone o viceversa. L'esperimento di Stern-Gerlach dimostrò che gli atomi di argento sono deviati in un campo magnetico disomogeneo in modo tale che si possa misurare lo spin dell'elettrone: metà degli atomi sono stati deviati in una certa direzione e l'altra metà nella direzione opposta. Tenendo conto del principio di Pauli, lo spin dell'elettrone ha una grande influenza sul movimento e sulla posizione della particella.

Per arrivare alla vera scoperta dello spin dell'elettrone bisogna però attendere il 1925 con l'esperimento di due fisici olandesi (G.E.Uhlenbeck e S.A.Goudsmit) che dimostrarono che lo spettro atomico può essere spiegato solo assumendo che gli elettroni abbiano spin.